



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**Otanmäen alueelta löydettyjen Nb-Zr-  
REE-mineralisoituneiden lohcareiden  
mineralogia, geokemia ja  
malminetsinnällinen merkitys**

Liisa Repo

GEOTIETEIDEN MAISTERIN TUTKINTO-OHJELMA

Pro gradu

Kesäkuu 2020

# ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Master degree Programme in Geology and Mineralogy		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Repo, Liisa Erika		Thesis Supervisor Kärenlampi K., Doctoral student, Luolavirta K., PhD	
Title of Thesis Mineralogy and geochemistry of Nb-Zr-REE mineralized glacial boulders from Otanmäki, central Finland: implications for REE exploration			
Major Subject Geosciences	Type of Thesis Master's Thesis	Submission Date June 2020	Number of Pages 77 p., 10 App.
<p><b>Abstract</b></p> <p>Boulder tracing carried out between 1982–1985 and 2016–2018 in the Otanmäki area, central Finland, has lead to discoveries of about 350 radioactive glacial drift boulders containing REEs, Nb, and Zr. Also, between 1982 and 1985, exploration drilling in the Otanmäki area led to the discovery of two Nb-Zr-REE-mineralized zones (Kontioaho, Katajakangas) in bedrock. Utilizing samples of the boulders discovered between 2016–2018 and data available for the older, the mineralogy and mineral chemistry, whole-rock major and trace element chemistry and physical properties of the REE-mineralized boulders has been studied and characteristics of the boulders compared to mineralized rocks in the Kontioaho and Katajakangas bedrock occurrences.</p> <p>The study shows that the boulders can be classified into types 1–5. Type 1 boulders are quartz-allanite gneisses and type 2 quartz-feldspar gneisses. Type 3 boulders are composed of peralkaline aegirine-bearing granite with REE-mineralized veins. Type 4 boulders are thorite-rich felsic gneisses and type 5 boulders fluorite-amphibole-rich gneisses. Allanite-(Ce) is the main carrier of the REEs in the boulders and is LREE-rich. Zircon is the most important Zr-bearing mineral and it has only minor REE content. The boulders also contain various Nb-REE-Th-U oxide minerals, including fergusonite, pyrochlore, samarskite, euxenite, aeschynite, and columbite, which are main carriers of Nb and minor carriers of REEs in the boulders. Some of the boulders also contain minor amounts of REE-fluorocarbonate and monazite. Types 1 and 2 represent 95% of the total number of boulders. Type 1 boulders show mineralogical and chemical affinity to the Katajakangas occurrence whereas most of the type 2 boulders show affinity to the Kontioaho occurrence. It is very likely that type 1 and 2 boulders are sourced from the known mineralized zones or similar still undiscovered occurrences in the Otanmäki area. The sources of boulders representing types 3–5 remain undiscovered. This study shows that in the Otanmäki area, there is notable potential for finding additional REE resources similar to the Kontioaho occurrence and type 2 boulders and also mineralization similar to that represented by the type 3 boulders.</p>			
<p><b>Additional Information</b></p> <p>Keywords: rare earth elements, allanite, boulder-tracing, Otanmäki</p>			

# TIIVISTELMÄ

## OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Geologian ja mineralogian koulutusohjelma		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Repo, Liisa Erika		Työn ohjaaja yliopistolla Kärenlampi, K., tohtorikoulutettava, Luolavirta K., PhD	
Työn nimi Otanmäen alueelta löydettyjen Nb-Zr-REE-mineralisoituneiden lohkareiden mineralogia, geokemia ja malminetsinnällinen merkitys			
Opintosuunta Geotieteet	Työn laji Pro gradu	Aika Kesäkuu 2020	Sivumäärä 77 s., 10 liitettä
Tiivistelmä			
<p>Otanmäen alueella Keski-Suomessa vuosien 1982–1985 ja 2016–2018 aikana suoritettujen lohkare-etsintöjen tuloksena on paikannettu yhteensä noin 350 radioaktiivista, jäätikön kuljettamaa lohkareta, joissa on kohonneita REE-, Nb-, ja Zr-pitoisuuksia. Lisäksi vuosina 1982–1985 Otanmäen alueen kallioperästä lävistettiin timanttikairauksella kaksi REE-Nb-Zr-mineralisoitunutta vyöhykettä, joille annettiin nimet Katajakangas ja Kontioaho. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan Otanmäen alueelta löydettyjen REE-mineralisoituneiden lohkareiden mineralogialla, mineraalikemialla, pää- ja hivenalkuainekoostumuksia ja fysikaalisia ominaisuuksia ja näitä tietoja vertaillaan alueen lohkareista 1980-luvulla raportoituun dataan sekä Katajakankaan ja Kontioahon vyöhykkeistä saatavilla oleviin tietoihin.</p>			
<p>Tutkimus osoittaa että löydetty lohkareet voidaan jakaa tyyppeihin 1–5. Tyypin 1 lohkareet ovat kvartsi- ja allaniittirikkaita gneissejä ja tyypin 2 lohkareet kvartsi- ja maasälpärikkaita gneissejä. Tyypin 3 lohkareet koostuvat peralkalisesta egriinigraniitista, jossa esiintyy REE-mineralisoituneita juonia. Tyypin 4 lohkareet ovat toriittirikkaita gneissejä ja tyypin 5 lohkareet fluoriitti-amfibolirikkaita gneissejä. Yleisin lantanidien kantajamineraali lohkareissa on allaniitti-(Ce), joka sisältää pääasiassa kevyitä lantanideja. Zirkoni on merkittävin Zr-kantajamineraali ja se sisältää myös pieniä määriä lantanideja. Lohkareissa esiintyy myös erilaisia Nb-REE-Th-U-oksidiimineraaleja, kuten pyroklooria, fergusoniiittia, samarskiittia, eukseniittia, aeschyniittia ja kolumbiittia, jotka ovat merkittävimpiä Nb-kantajamineraaleja ja sisältävät myös pieniä määriä lantanideja. Lisäksi osassa lohkareissa esiintyy pieniä määriä REE-fluorokarbonaattia ja monatsiittia. Lohkareiden kokonaismäärästä 95%-a vastaa kemialliselta ja mineralogiselta koostumukseltaan tyyppiä 1 ja 2. Tyypin 1 lohkareiden mineraloginen ja kemiallinen koostumus vastaa hyvin Katajakankaan mineralisaatiota kun taas tyypin 2 lohkareet muistuttavat Kontioahon mineralisaatiota. On todennäköistä, että pääosa tyypin 1 ja 2 lohkareista on peräisin Katajakankaan ja Kontioahon vyöhykkeistä, tai niitä vastaavista, mutta vielä paikantamattomista kallioperän lähteistä. Tyypin 3–5 lohkareita ei ole paikannettu lähtöpaikkaansa. Tutkimusalueella on eniten potentiaalia löytää uusia Kontioahon vyöhykkeen ja tyypin 2 lohkareiden sekä tyypin 3 lohkareiden kaltaisia REE-mineralisaatioita.</p>			
Muita tietoja			
Avainsanat: harvinaiset maametallit, allaniitti, lohkare-etsintä, Otanmäki			

## SISÄLLYSLUETTELO

Abstract.....	2
Tiivistelmä .....	3
1. Johdanto .....	7
2. Tutkimuksen tavoitteet .....	8
3. Lantanidiesiintymät .....	8
3.1. Lantanidien kemialliset ominaisuudet.....	8
3.2. Lantanidiesiintymien ryhmittely .....	12
3.3. Primääriset esiintymätyypit.....	12
3.3.1. Yleisesti primäärisistä esiintymistä .....	12
3.3.2. Peralkaliseen magmatismiin liittyvät lantanidiesiintymät .....	13
3.3.3. Peralkaliset piialikylläiset magmakivet .....	14
3.3.4. Peralkaliset graniitit .....	14
3.3.5. Karbonaattiyesiintymät .....	15
3.4. Sekundääriset esiintymät.....	15
3.5. Mineralisaatioprosessit.....	16
3.5.1. Magmaattiset prosessit.....	16
3.5.2. Magmaattishydrotermiset ja hydrotermiset prosessit .....	17
3.6. Lantanidimineraalit .....	18
3.6.1. Monatsiitti.....	18
3.6.2. Nb-REE-Th-U-oksidit .....	19
3.6.3. Allaniitti .....	20
3.6.4. Zirkoni .....	20
3.6.5. REE-fluorokarbonaatit.....	20
3.7. Lantanidiesiintymien taloudellinen hyödyntäminen .....	21
4. Lantanidiesiintymät Suomessa .....	21
5. Tutkimusalueen geologiset piirteet.....	22
5.1. Alueen olennaisimmat geologiset tapahtumat .....	22



5.2.	Otanmäki sarjan A1-tyyppin syväkivet.....	25
6.	Aikaisemmat tutkimukset .....	27
7.	Tutkimusmenetelmät .....	27
8.	Tulokset .....	31
8.1.	Lohkareiden luokittelu .....	31
8.2.	Lohkareiden löytöpaikat.....	31
8.3.	Lohkareiden fysikaaliset ominaisuudet.....	34
8.4.	Petrografia .....	37
8.4.1.	Yleisesti kaikista lohkaretyypeistä.....	37
8.4.2.	Tyyppi 1 .....	39
8.4.3.	Tyyppi 2.....	41
8.4.4.	Tyyppi 3.....	42
8.4.5.	Tyyppi 4.....	43
8.4.6.	Tyyppi 5.....	43
8.5.	Mineraalikemia .....	44
8.5.1.	Allaniitti .....	44
8.5.2.	Zirkoni .....	46
8.5.3.	Nb-REE-U-Th-oksidit .....	47
8.5.4.	REE-fluorokarbonaatti.....	49
8.6.	Kokokivigeokemia .....	50
8.6.1.	Pääalkuaineet .....	50
8.6.2.	Nb-, Zr- ja lantanidipitoisuudet .....	55
8.6.3.	Muut hivenalkuaineet .....	59
9.	Pohdinta .....	61
9.1.	Lohkareiden fysikaaliset ominaisuuksien ja viuhkojen tulkintaa .....	61
9.2.	Lohkareluokittelu ja Otanmäen alueen REE-potentiaali.....	62
10.	Johtopäätökset.....	66
11.	Kiitokset.....	68

12. Kirjallisuusluettelo.....	69
LIITTEET.....	76
Liite 1. Kannettavan XRF-spektrometrin mittaustulokset.....	76
Liite 2. Lohkareiden fysikaaliset ominaisuudet.....	86
Liite 3. Kentältä kerätyt tiedot lohkareista.....	90
Liite 4. Kannettavan XRF-spektrometrin mittaustulosten vertailu geolaboratoriossa tehtyihin ICP-OES/-MS kokokivianalyysihin.....	95
Liite 5. Bureau Veritaksessa tehtyjen kokokivianalyysien tulokset.....	96
Liite 6. Laboratorioanalyysien standardien vertailu referenssiarvoihin.....	98
Liite 7. Rautaruukki Oy:n teettämät XRF-spektrometrin mittaustulokset.....	99
Liite 8. Petrographic descriptions.....	105
Liite 9. Mikroanalysaattorin standardianalyysien tulokset ja standardikoostumukset.....	133
Liite 10. EPMA-tulokset.....	134

## 1. JOHDANTO

Harvinaiset maametallit (engl., rare earth elements, REE) ovat 17 alkuaineen ryhmä, johon kuuluu 15 lantanidia (La-Lu) sekä yttrium (Y) ja skandium (Sc) (Voncken 2015). Harvinaisten maametallien käyttö on lisääntynyt teollisuudessa ja teknologiassa viime vuosina, minkä takia myös niiden kysyntä on kasvanut (Balaram 2019). Nykyinen REE-tuotanto on keskittynyt pääosin Kiinaan (Weng et al. 2015). Tuotannon epätasainen jakaantuminen maantieteellisesti kasvattaa riskiä harvinaisten maametallien saatavuudesta esimerkiksi poliittisista tai taloudellisista syistä, minkä takia harvinaisten maametallien malminetsintä on kasvanut maailmanlaajuisesti viimeisen kymmenen vuoden aikana (Graedel 2015; Balaram 2019).

Suomesta on saatu valtakunnallisen pohjajamareenin geokemiallisen kartoituksen ja radioaktiivisten mittauksien avulla useita viitteitä REE-mineralisaatioista, joista yksi lupaavimmista sijaitsee Otanmäessä, Keski-Suomessa (Sarapää et al. 2013). Ensimmäiset viitteet kohonneista Nb- ja REE-pitoisuuksista tehtiin Otanmäen alueen graniiteista jo 1960-luvulla (Marmo et al. 1966). Malminetsinnän alueella käynnistivät vuonna 1981 löydetty radioaktiiviset lohkareet, jotka sisälsivät korkeita pitoisuuksia lantanideja ja myös muita harvinaisia metalleja, kuten zirkoniumia (Zr) ja niobiumia (Nb) (Äikäs 1990). Vuosina 1982–1985 Geologian tutkimuskeskus (GTK) ja Rautaruukki Oy:n malminetsintäosasto suorittivat Otanmäen alueella malminetsintää, jonka tuloksena löydettiin 280 lantanideista mineralisoitunutta lohkareta ja joiden perusteella paikannettiin kallioperästä kaksi mineralisoitunutta vyöhykettä, joille annettiin nimet Kontioaho ja Katajakangas (Hugg ja Heiskanen 1986; Äikäs 1990; Kärenlampi et al. 2020). Malminetsintäyhtiö Otanmäki Mine Oy jatkoi lohkare-etsintää Otanmäen alueella vuosina 2016–2018. Viimeisimpien etsintöjen tuloksena paikannettiin 230 uutta lohkareta, joissa on kohonneita REE-, Nb- ja Zr-pitoisuuksia. Alustava tutkimus uusista lohkarelöydöksistä on tukenut aikaisempaa käsitystä, jonka mukaan pääosa löydettyistä lohkareista on todennäköisesti peräisin jo tunnetuista Kontioahon ja Katajakankaan vyöhykkeistä, mutta osa lohkareista vaikuttaa olevan lähtöisin vielä tunnistamattomista kallioperän lähteistä, minkä takia lohkareiden tarkempi tutkimus on perusteltua. Tässä pro gradu -tutkielmassa pyritään kuvaamaan sekä

uusista että vanhoista REE-, Nb- ja Zr-lohkareista kerättyjen kemiallisten, mineralogisten sekä fysikaalisten tietojen perusteella lohkareiden edustamat mineralisaatiotyypit. Kerättyjen tietojen avulla pyritään arvioimaan lohkareiden lähdettä kallioperässä ja Otanmäen alueen malminetsintäpotentiaalia.

## **2. TUTKIMUKSEN TAVOITTEET**

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää Otanmäen alueelta paikannettujen REE-, Nb- ja Zr-mineralisoituneiden lohkareiden lohkareiden geokemiaa, mineralogaa ja fysikaalisia ominaisuuksia. Tutkimuksessa on tarkoitus vertailla uusista lohkarelöydöksistä kerättyä dataa 1980-luvulla paikallistetuista lohkareista ja Kontioahon ja Katajakankaan mineralisoituneista vyöhykkeistä raportoituun dataan (Hugg ja Heiskanen 1986; Kärenlampi et al. 2020). Lisäksi tutkimuksen tavoitteena on luoda lohkareille tyyppiluokittelu perustuen kemialliseen ja mineralogiseen koostumukseen ja fysikaalisiin ominaisuuksiin. Lohkareiden luokittelulla pyritään rajaamaan millaisia mineralisaatiotyyppisiä lohkareet edustavat ja arvioimaan lohkareiden lähdettä Otanmäen alueen kallioperässä. Tutkimuksen tavoitteiden saavuttamiseksi on tässä työssä myös perehdytty lantanidimalmeja ja -malminmuodostusprosesseja käsittelevään kirjallisuuteen.

## **3. LANTANIDIESIINTYMÄT**

### **3.1. Lantanidien kemialliset ominaisuudet**

Lantanidit sijoittuvat jaksollisessa järjestelmässä kuudenteen jaksoon bariumin ja hafniumin väliin (Kuva 1) (Voncken 2015). Lantanidiryhmään kuuluvia alkuaineita ovat lantaani (La), cerium (Ce), praseodyymi (Pr), neodyymi (Nd), prometium (Pm), samarium (Sm), europium (Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), dysprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), thulium (Tm), ytterbium (Yb) ja lutetium (Lu) (Voncken 2015). Lantanidit jaetaan atomipainonsa perusteella kahteen ryhmään: kevyisiin (engl., LREE, light rare earth elements) ja raskaisiin (engl., HREE, heavy rare earth elements). Kevyisiin lantanideihin kuuluvat alkuaineet lantaniumista samariumiin ja raskaisiin alkuaineet europiumista lutetiumiin (Voncken 2015). Lantanidit luetaan harvinaisten maametallien ryhmään, johon luetaan myös kemiallisesti lantanidien kanssa samalla tavalla käyttäytyvä yttrium ja skandium, jotka sijoittuvat jaksollisessa järjestelmässä 5. ja 4. jaksoon (Voncken 2015).

Ryhmä	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Jakso	1 1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be	Harvinaiset maametallit										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
Lantanidit			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
Kevyet lantanidit			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	
Raskaat lantanidit																		

Kuva 1. Harvinaisten maametallien ryhmän alkuaineiden sijoittuminen jaksollisessa järjestelmässä (Wikimedia Commons 2008).

Yttrium lasketaan kuuluvan raskaiden lantanidien ryhmään koska sillä on lähes samankokoinen ionisäde kuin  $\text{Ho}^{3+}$  ja  $\text{Er}^{3+}$  -ioneilla. Skandiumin geokemiallinen käyttäytyminen vastaa enemmän muiden 4. jakson siirtymäalkuaineiden käyttäytymistä, koska sillä on pienempi ionisäde, kuin lantanideille, minkä vuoksi sen luokittelu harvinaisten maametallien ryhmään on vaihtelevaa tieteellisessä kirjallisuudessa (Voncken 2015). Hydrotermisissä fluideissa skandiumin on kuitenkin todettu käyttäytyvän samalla tavalla muiden harvinaisten maametallien kanssa (McLennan 2012), jonka vuoksi Sc:a usein luokitellaan harvinaisten maametallien ryhmään.

Lantanidit ovat kemiallisesti hyvin samanlaisia, koska niillä on yleensä sama varaus ja ionisäteet eroavat toisistaan vähän (Linnen et al. 2014). Myös niiden elektronikonfiguraatiot ovat hyvin lähellä toisiaan: niillä on samat valenssielektronit 6s ja 5d atomiorbitaaleilla ja niitä erottavat ainoastaan elektronien määrä 4f-orbitaalilla, joka täyttyy lantanidien järjestysluvun kasvaessa (Balaram 2019; Bea 2015). Näiden samanlaisten kemiallisten ominaisuuksien takia lantanidien erottaminen kemiallisesti toisistaan tieteellisessä tutkimuksessa on ollut haasteellista. Cerium eristettiin ensimmäisenä lantanidina muista lantanideista vuonna 1839, josta seurasi noin sata vuotta ketänyt ajanjakso, jonka aikana uusia



toistensa kanssa esiintyviä lantanideja löydettiin lisää ja pystyttiin eristämään tutkimusmenetelmien kehittyessä (Cotton 2013; Voncken 2015). Viimeinen lantanidi, radioaktiivinen prometium, löydettiin vuonna 1947 (Marinsky et al. 1947).

Toisin kuin lantanidien löytyessä 1800-luvulla luultiin, eivät ne todellisuudessa ole kovin harvinaisia. Lantanidien yhteenlaskettu keskimääräinen pitoisuus vaihtelee mantereisessa maankuoressa välillä 150–220 ppm (Rudnick ja Gao 2003). Runsaslukuisimpien lantanidien, ceriumin ja lantaanin, pitoisuudet ylemmässä mantereisessa maankuoressa ovat 63 ppm ja 31 ppm, mitkä ovat esimerkiksi suuremmat kuin kuparilla (28 ppm) (Rudnick ja Gao 2003). Koska lantanidit ovat kemiallisilta ominaisuuksiltaan hyvin samanlaisia, ne myös käyttäytyvät kemiallisesti hyvin samalla tavalla ja esiintyvät toistensa kanssa samoissa mineraaleissa (Möller et al. 1986; Cotton 2013). Lantanidit esiintyvät luonnossa monenlaisten mineraalien rakenteissa, tunnetuimpina fosfaatti- (esim. monatsiitti, ksenotiimi, apatiitti), karbonaatti- (esim. bastnäsiitti) ja silikaattimineraalit (esim. allaniitti) (Chakhmouradian ja Wall 2012). Yleisimpiä lantanideja sisältäviä mineraaleja ovat silikaatit (noin 43% lantanidimineraaleista) ja karbonaatit (23%) ja uusia lantanidimineraaleja löydetään lisää joka vuosi (Chakhmouradian ja Wall 2012). Yleisesti lantanideja esiintyy myös ppm-tason pitoisuuksina yleisimmissä kiviä muodostavissa silikaattimineraaleissa, kuten esimerkiksi maasälvässä, mutta suurempina pitoisuuksina lantanidit esiintyvät magmakivissä ja metamorfisissa kivissä yleensä vain aksessorisissa mineraaleissa, kuten monatsiitissa (Bea 2015).

Lantanidit ovat ulkonäöltään hopeisia, valkohopeita tai harmaita ja niillä on voimakas metallinkiilto. Lantanideilla on myös korkea sähkönjohtavuus ja ne ovat paramagneettisia (Voncken 2015). Lantanidien liukoisuus fluideihin eroaa vain vähän toisistaan ja ne korvaavat helposti toisiaan sekä alkuaineita, joilla on samanlaisia kemiallisia ominaisuuksia (Möller et al. 1986; Voncken 2015). Lantanidimineraaleissa lantanidien pitoisuudet vaihtelevat yleensä LREE- ja HREE-ryhmien puitteissa, mikä johtuu eroista lantanidien ionisäteessä: ionisäde pienenee alkuaineen järjestysluvun kasvaessa (Voncken 2015). Tästä syystä esimerkiksi kevyet lantanidit korvaavat mineraaleissa isoimpia ioneja, kuten

esimerkiksi cerium allaniitissa kalsiumia ja raskaat lantanidit taas korvaavat mineraaleissa pienempiä ioneita, kuten zirkoniumia zirkonissa (Gieré ja Sorensen 2004). Lantanidit voivat myös muodostaa välttämättömän osan mineraalirakennetta (esim. kevyet lantanidit monatsiitissa) (Ni et al. 1995).

Lantanidien hapetusluku on yleensä 3+, mutta Ce ja Eu voivat myös esiintyä hapetusluvulla 4+ tai 2+ ja Yb ja Sm hapetusluvulla 2+ (Haire ja Eyring 1994, Linnen et al. 2014). Nämä poikkeavat hapetusluvut alkuaineilla Ce, Eu, Yb ja Sm voivat johtaa kyseisten alkuaineiden käyttäytymiseen anomaalisesti geologisissa prosesseissa verrattuna muihin lantanideihin. Esimerkiksi Ce- ja Eu-pitoisuudet voivat käyttäytyä anomaalisesti verrattuna järjestysluvultaan viereisten lantanidien pitoisuuksiin (esim. La ja Pr tai Sm ja Gd). Tätä tapahtuu varsinkin silloin kun alkuaineet Ce ja Eu esiintyvät mineraaleissa, joita 3+ valenssilla esiintyvät lantanidit eivät voi paikata. Esimerkiksi  $\text{Eu}^{2+}$  ioni voi paikata  $\text{Ca}^{2+}$  ionia plagioklaasissa (Sverjensky 1984).

Pearsonin (1963) sääntö toimii perustana tarkastellessa lantanidien kemiallista sitoutumista muiden alkuaineiden kanssa. Pearsonin säännön mukaan kovat, eli poolittomat kationit, sitoutuvat mielellään kovien anionien kanssa ja päinvastoin eli pehmeät kationit sitoutuvat mielellään pehmeiden anionien kanssa. Lantanidi-ionit ovat kovia kationeja niiden varauksen ja ionisäteen perusteella, ja ne muodostavat Pearsonin säännön mukaan helposti pysyviä sidoksia kovien elektronegatiivisten alkuaineiden ja molekyyliyhdisteiden kanssa. Pearsonin säännön mukaan lantanidien pitäisi muodostaa sidoksia monovalenttien epäorgaanisten ligandien kanssa todennäköisimmin tässä järjestyksessä:  $\text{F}^- > \text{OH}^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Br}^-$  ja divalenttien ligandien kanssa seuraavassa järjestyksessä:  $\text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{P}_2\text{O}_5^{2-}$ . Viime vuosina on kuitenkin havaittu myös poikkeamia tästä säännöstä (Migdisov et al. 2009).

Harvinaisten maametallien esiintyminen mantereisessa ja merellisessä maankuoressa noudattaa Oddo-Harkinsin sääntöä (Oddo 1914; Harkins 1917; McDonough ja Sun 1995; Rudnick ja Gao 2003), jonka mukaan parillinen protonimäärä atomeissa on stabiilimpi kuin pariton määrä protoneja, minkä takia

parillisen järjestysnumeron omaavat lantanidit ovat yleisempiä yleisesti maankuoressa kuin parittomat. Tästä aiheutuu lantanidipitoisuuksia kuvaavassa kaavioissa siksak-efekti, jonka vuoksi lantanidipitoisuuksia kuvataan diagrammeissa yleensä normalisoimalla lantanidipitoisuudet johonkin yleisesti käytettyyn vertailudataan, esimerkiksi koko maapallon koostumusta edustavaan kondriittien koostumukseen tai maan kuorta ja vaippaa edustavan primitiivisen vaipan koostumukseen (McDonough ja Sun 1995).

### 3.2. Lantanidiesiintymien ryhmittely

Lantanidimineralisaatiot voidaan jakaa primäärisiin ja sekundäärisiin. Primääristen mineralisaatioiden uskotaan syntyneen joko magmaattisesti tai magmaattis-hydrotermisesti ja sekundääristen rapautumalla joko mekaanisesti tai kemiallisesti primääreistä esiintymistä. Primääriset esiintymätyypit jaetaan kemiallisen koostumuksen mukaan kolmeen päätyyppiin: 1) peralkaliset piialikylläiset magmakivet, 2) peralkaliset graniitit ja 3) karbonatiitit. Lisäksi kohonneita lantanidipitoisuuksia tavataan myös mm. IOCG-tyyppisissä (iron oxide-copper-gold) esiintymissä, fosforiesiintymissä ja peralkalisissa vulkaniiteissa (Wu 2008; Dostal 2016; Emsbo et al. 2016). Näissä mineralisaatiotyypeissä lantanidit ovat potentiaalisia sivutuotteita muiden metallien ja raaka-aineiden tuotannon yhteydessä. Lantanidiesiintymissä esiintyy yleisesti myös kohonneita pitoisuuksia muita harvinaisia metalleja, kuten Th, U, Zr, Hf, Nb ja Ta (Linnen et al. 2014).

### 3.3. Primääriset esiintymätyypit

#### 3.3.1. Yleisesti primäärisistä esiintymistä

Magmaattiset lantanidimineralisaatiot esiintyvät usein suurissa magmaattisissa provinsseissa, joissa esiintyy rakenteeltaan, kemialliselta koostumukseltaan ja iältään erilaisia intrusioita (Linnen et al. 2014; Dostal 2016; Verplanck et al. 2016). Esimerkkinä näistä suurista provinsseista mainittakoon myös Suomen puolelle Kuusamossa ja Soklissa ulottuva Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssi, jossa on tavattu lantanideista rikastuneita vyöhykkeitä karbonatiiteista, peralkalisista piialikylläisiä magmakivistä sekä peralkalisista graniiteista (Kalashnikov et al. 2016). Pääosa Kuolan niemimaan lantanidimineralisaatioista liittyy alkaliseen magmatismiin, joka tapahtui noin 360–380 Ma (miljoonaa vuotta



sitten), mutta lantanidimineralisaatioita on tavattu alueella myös arkeisessa peralkalisessa graniitissa, jonka iäksi on arvioitu noin 2600 Ma (Kalashnikov et al. 2016). Kuolan niemimaan nuorempien alkalikivi-intruusioiden tektoniseksi synty-ympäristöksi on tulkittu paikallinen alapuolisen vaipan kohoaminen ja mantereisen kuoren laajeneminen (Linnen et al. 2014; Kalashnikov et al. 2016).

### 3.3.2. Peralkaliseen magmatismiin liittyvät lantanidiesiintymät

Magmakiviä, joissa  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  (molaarinen) on  $<1$  kutsutaan peralkalisiksi (Frost ja Frost 2008; Frost et al. 2001). Peralkalisten kivien ryhmään lukeutuu sekä piialikylläisiä että piylikylläisiä magmakivilajeja, kuten nefeliinisyyeniitti, syeniitti ja graniitti (Dostal 2016). Peralkalisia kiviä karakterisoivat yleensä korkeat Fe/Mg ja F/H<sub>2</sub>O suhteet ja matalat Eu- ja Sr-pitoisuudet (Černý et al. 2005; Salvi ja Williams-Jones 2005). Lisäksi lantanidimineralisoituneissa peralkalisissa magmakivissä on yleensä huomattavat U- ja Th-pitoisuudet (Dostal 2016).

Graniittien luokittelussa peralkaliset graniitit vastaavat kemiallisesti ja synty-ympäristön perusteella yleensä A-tyypin graniitteja (Dostal 2016). Termin A-tyypin graniitti määrittävät Loiselle ja Wones (1979), millä he viittasivat Fe-rikkaisiin granitoideihin, joiden synty liittyy mantereisiin anorogeenisiin olosuhteisiin. A-tyypin graniiteissa on korkeat Fe/(Fe+Mg) -suhde, K<sub>2</sub>O-pitoisuus, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O -suhde ja korkeat sopeutumattomien alkuaineiden, kuten REE-, Zr-, Nb- ja Ta-pitoisuudet. Eby (1990) esitti A-tyypin graniiteille kaksi alatyyppeä: A1 ja A2. A1-tyyppi viittaa graniittisiin magmoihin, joita karakterisoi matala Y/Nb-suhde ja jotka ovat syntyneet fraktioitumalla OIB-tyyppisistä (engl., oceanic island basalt) mafisista magmoista anorogeenisissä ympäristöissä (Eby 1990, 1992; Arzamastsev et al. 2001), kun taas A2-tyyppi viittaa graniittisiin magmoihin, joissa on korkea Y/Nb-suhde ja joiden on tulkittu syntyvän differentioitumalla tholeiittisista basalteista tai mantereisen kuoren osittaissulamaisessa sekä törmäävien että erkävien laattarajojen ympäristöissä (Eby 1990, 1992; Bonin 2007; Nardi ja Bitencourt 2009; Rudnick ja Gao 2003).

### 3.3.3. *Peralkaliset piialikylläiset magmakivet*

Peralkalisten piialikylläisten alkalikivien esiintymistä toimivat esimerkkeinä Hiipinän ja Luujärven intruusiot Kuolan niemimaalla, Ilímaussaquin intruusio Grönlannissa ja Nechalachon intruusio Kanadan luoteisosissa (Dostal 2016). Peralkalisten piialikylläisten lantanidiesiintymien isäntäkivenä on yleensä nefeliinisyeniiitti ja mineralisaatiot esiintyvät yleensä kerroksellisessa intruusiossa, jossa lantanidit ovat rikastuneet fraktioituvan kiteytymisen seurauksena muodostaen intruusioon lantanidimineraaleista rikastuneita kerroksia (Chakhmouradian ja Zaitsev 2012; Dostal 2016). Nefeliinisyeniiitteihin liittyville lantanidiesiintymille on tyypillistä, että lantanideja sisältäviä mineraaleja saattaa olla kymmeniä tai satoja erilaisia yhdessä esiintymässä (Sørensen 2001). Kuolan niemimaalla Hiipinän ja Luujärven esiintymissä lantanideja hyödynnetään tällä hetkellä sivutuotteina esim. apatiitin, Nb- ja Ta-tuotannossa. Hiipinän ja Luujärven esiintymissä  $\text{REE}_2\text{O}_3$ -pitoisuus on pääosin alle 1 p.-% (Kalashnikov et al. 2016). Kuolan niemimaalla sijaitsevien lantanidiesiintymien yhteenlasketuiksi  $\text{REE}_2\text{O}_3$ -malmivaroiksi on arvioitu noin 22.4 Mt (miljoonaa tonnia) (Kalashnikov et al. 2016). Nechalachon esiintymässä lantanidipitoisuus on keskimäärin vain hieman suurempi kuin Kuolan niemimaalla,  $\text{REE}_2\text{O}_3$ -pitoisuudeksi on arvioitu noin 1.53 p.-%, mutta malmivarat ovat huomattavasti suuremmat, noin 88 Mt ( $\text{REE}_2\text{O}_3$ ) (Williams-Jones et al. 2012).

### 3.3.4. *Peralkaliset graniitit*

Lantanidimineralisaatiot jotka liittyvät peralkalisiin graniitteihin esiintyvät yleensä intruusioissa, joissa on tavattu magmaattista vyöhykkeellisyttä, kuten graniitti-, pegmatiitti- ja syeniittivyöhykkeitä, jotka on tulkittu peralkalisen magman eri kehitysvaiheiksi (Vasyukova ja Williams-Jones 2019). Taloudellisesti kiinnostavia lantanidimineraalien rikastumia esiintyy yleensä peralkalisen graniittimagman kiteytymisen loppuvaiheen pegmatiitti- ja graniittijuonissa (Chakhmouradian ja Zaitsev 2012; Dostal 2016). Useiden peralkalisiin graniitteihin liittyvien lantanidimineralisaatioiden muodostumiseen liittyy usein myös myöhäinen hydroterminen muuttuminen kuten Strange Laken esiintymässä Kanadassa, missä lantanidimineralisaatio esiintyy hydrotermisesti muuttuneissa pegmatiittijuonissa ja graniitissa (Vasyukova ja Williams-Jones 2019). Lantanidimineraalit ovat Strange Lakessa Ca-silikaattimineraaleja (allaniitti, kainosiitti ja gereniitti), jotka



ovat syntyneet metasomaattisesti primääreistä (magmaattisista) mineraaleista (Williams-Jones et al. 2012). Strange Laken malmivaroiksi on arvioitu noin 66 Mt ja  $\text{REE}_2\text{O}_3$ -pitoisuudeksi 1.52 p.-% (Williams-Jones et al. 2012).

### 3.3.5. Karbonatiittiesiintymät

Karbonatiitit ovat magmakiviä, jotka koostuvat >50% primääreistä karbonaattimineraaleista, kuten kalsiitista ja dolomiitista ja niissä on alle 20 p.-%  $\text{SiO}_2$  (Le Maitre 2002). Valtaosaan karbonatiiteista ei liity merkittäviä mineralisaatioita, mutta osassa niistä voi olla taloudellisesti merkittäviä fosfori-, kupari-, Nb- ja/tai LREE-esiintymiä (Verplanck et al. 2016). Karbonatiitteja on historiallisesti eniten hyödynnetty keveiden lantanidien tuotannossa ja ne sisältävät myös pääosan maailman Nb- ja Ta-malmivaroista (Verplanck et al. 2016; Linnen et al. 2014). Karbonatiittiseen magmatismiin liitettyjä lantanidiesiintymiä ovat mm. Bayan Obon esiintymä Kiinassa ja Mountain Passin esiintymä USA:ssa (Chakhmouradian ja Zaitsev 2012; Verplanck et al. 2016). Maailman suurimman lantanidiesiintymän, Bayan Obon, malmivaroiksi on arvioitu noin 48 Mt ja  $\text{REE}_2\text{O}_3$ -pitoisuudeksi 6 p.-%:a (Wu 2008). Bayan Obossa tuotetaan lantanidien ohella myös rautaa (Weng et al. 2015). Mountain Passin (Yhdysvallat) esiintymän malmivaroiksi on arvioitu noin 16.7 Mt ja  $\text{REE}_2\text{O}_3$ -pitoisuudeksi 7.98 p.-% (Castor 2008; Mariano ja Mariano 2012).

### 3.4. Sekundääriset esiintymät

Sekundääriset lantanidiesiintymät syntyvät joko rapautumalla mekaanisesti tai kemiallisesti kallioperästä, joka sisältää lantanidimineraaleja. On todettu, että sekundäärisiä esiintymiä on syntynyt mm. karbonatiiteista ja graniiteista (Verplanck ja Hitzman 2016; Sanematsu ja Watanabe 2016). Sekundääriseen esiintymän syntyyn vaikuttaa primäärisen isäntäkiven koostumuksen lisäksi rapautumisolosuhteet. Esimerkiksi karbonatiiteille on tyypillistä voimakas kemiallinen rapautuminen kosteassa ilmastossa. Karbonaattimineraalien karbonaattiaines rapautuu pois, mutta lantanidit eivät liiku yhtä herkästi samoissa kosteissa olosuhteissa ja rikastuvat paikalleen muodostaen sekundäärisiä REE-mineraaleja (Verplanck ja Hitzman 2016). Vaikka sekundäärisissä esiintymissä ei

yleensä esiinny kovin suuria lantanidipitoisuuksia, ovat ne taloudellisia matalien kaivostoimintakulujen takia ja esiintymien suuren koon vuoksi (Linnen et al. 2014).

Sekundäärisiä esiintymätyyppejä on neljä: bauksiitti, lateriitti, upamalmi ja ioniadsorptiosavet. Bauksiittien ja lateriittien lantanidit voidaan hyödyntää muiden perusmetallien kuten raudan, alumiinin ja nikkelin tuotannon sivutuotteena (Linnen et al. 2014). Lantanidituotanto upamalmeista on ollut tärkeää historiallisesti ja niistä yksi merkittävin on monatsiittihiekat (Sengupta ja Van Gosen 2016). Upamalmi syntyyvät rapautumalla mekaanisesti isäntäkivistä, jonka jälkeen ne lajittuvat veden tai tuulen vaikutuksesta muiden raskaampien mineraalien, kuten ilmeniitin tai kullan kanssa esimerkiksi raskasmineraalikerrostumiin ranta- ja jokiympäristöissä (Sengupta ja Van Gosen 2016). Tällä hetkellä yksi tärkeimmistä sekundäärisistä esiintymätyypeistä on ioniadsorptiosavet, joissa jopa 70% lantanideista esiintyy kationeina, jotka ovat adsorptoituneet Al-verkkosilikaattien kuten kaoliniitin ja halloysiitin pinnalle (Sanematsu ja Watanabe 2016). Pitoisuudet ioniadsorptiosavissa vaihtelevat välillä 0.05–0.2 p.-% (Chakhmouradian ja Wall 2012).

### 3.5. Mineralisaatioprosessit

#### 3.5.1. Magmaattiset prosessit

Magmaattisessa kiteytymisessä lantanidit käyttäytyvät sopeutumattomina alkuaineina, koska ne eivät ioni-säteensä ja elektronivarauksensa vuoksi ole sopivia korvaamaan alkuaineita yleisimpien kiviä muodostavien mineraalien rakenteissa (Weng et al. 2015). Tämän seurauksena lantanidit voivat rikastua magmaan jo hyvin varhaisessa vaiheessa vaipan sulamista ja rikastua fraktioivan kiteytymisen seurauksena jäännössulissa (Chakhmouradian ja Zaitsev 2012; Linnen et al. 2014; Jordan et al. 2015; Dostal 2016). Lantanidien fraktioitumiseen magmaattisessa kiteytymisessä vaikuttavat erot keveiden ja raskaiden lantanidien ionisäteissä (Gieré ja Sorensen 2004; Prowatke ja Klemme 2005; Rubatto ja Hermann 2007; Luo ja Ayers 2009) sekä hapen fugasiteetti (Gieré et al. 1999). Hapen fugasiteetti magmaattisessa systeemissä vaikuttaa erityisesti usealla hapetushuvulla esiintyvien lantanidien kuten Eu:n (Linnen et al. 2014), mutta myös usein lantanidien kanssa esiintyvän raudan hapetuskuluun (Gieré et al. 1999).

### 3.5.2. Magmaattishydrotermiset ja hydrotermiset prosessit

Lantanidien on todettu olevan immobiileja yleisissä hydrotermisissä prosesseissa (Weng et al. 2015). Monissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu fluidien pystyvän mobilisoimaan ja kuljettamaan lantanideja, jos lämpötila on suhteellisen korkea (yli 150 °C) ja fluideissa on mukana lantanidia kuljettavia ligandeja (Haas et al. 1995; Gilbert ja Williams-Jones 2008; Migdisov et al. 2009; Möller et al. 2009). Pearsonin (1963) säännön mukaan kovat kationit muodostavat mielellään sidoksen kovien anionien kanssa, koska silloin sidoksessa kationit ja anionit saavuttavat oktetin ja niiden kemiallinen stabiilisuus kasvaa. Tämän takia on todennäköistä, että lantanidit liikkuvat hydrotermisissä fluideissa kemiallisesti sitoutuneina komplekseina kovien anionien kanssa sen sijaan että ne olisivat fluideissa vapaina kationeina (Williams-Jones et al. 2012). Teoreettisten mallien mukaan  $F^-$  ja  $CO_3^{2-}$ -lantanidikompleksit ovat kaikista stabiilimpia fluideissa, minkä takia  $F^-$  ja  $CO_3^{2-}$  on arveltu olevan todennäköisimpiä lantanideja kuljettavia ligandeja (Haas et al. 1995; Wood 1990; Williams-Jones et al. 2000). Migdisov et al. (2009) kokeellisessa tutkimuksessa kuitenkin todettiin, että näissä teoreettisissa tutkimuksissa  $F^-$ -kompleksien stabiilisuutta on yliarvioitu ja  $Cl^-$ -kompleksien stabiilisuutta aliarvioitu lämpötilan kasvaessa välillä 150–300 °C. Kloridikompleksien lisäksi myös  $SO_4^{2-}$ -kompleksien kyky kuljettaa lantanideja on todettu teoreettisia malleja suuremmaksi (Migdisov ja Williams-Jones 2014). Näiden havaintojen perusteella Migdisov ja Williams-Jones arvioivat, että lantanidien fluidikuljetus tapahtuisikin pääasiassa karbonaatti-, kloridi- ja/tai sulfaattikomplekseina, kun taas fluori edistää lantanidien kiteytymistä F-rikkaisiksi mineraaleiksi kuten fluoseriitti-(Ce) ja bästnasiitti-(Ce). Tätä tukee havainnot muun muassa siitä, että lantanidifluoridit ja fluoriitti ovat erittäin liukenemattomia vesipitoisiin fluideihin korkeissa lämpötiloissa (Hoshino et al. 2007; Migdisov et al. 2009; Agangi et al. 2010; Sheard et al. 2012). Magmaattishydrotermisissä systeemeissä lantanidien rikastumista edistäviä tekijöitä ovat siis fluidien suhteellisen korkea lämpötila (Montel 1993; Migdisov et al. 2009) ja sopivien ligandien läsnäolo (Migdisov et al. 2009), mutta lisäksi on huomattu, että lantanidien liukeneminen fluideihin suosii happamia tai neutraaleja olosuhteita (Wood ja Williams-Jones 1994; Poitrasson et al. 2004). Esimerkiksi Lewis et al. (1998) huomasivat että geotermisissä fluideissa vapaiden lantanidi<sup>3+</sup>-kationien määrä kasvaa pH:n laskiessa.



Keveät lantanidit ovat raskaita lantanideja stabiilimpia sekä fluoridi- ja kloridi-ionien kanssa matalammissa lämpötiloissa, jonka vuoksi ne ovat myös liikkuvaisempia hydrotermisissä systeemeissä (Midgisov et al. 2009). Samanlaiseen tulokseen tulivat myös William-Jones et al. (2012) kun he huomasivat, että raskaat ja kevyet lantanidit voivat fraktioitua fluideissa, kun sivukiven puskurointikyky pH:n osalta heikkenee.

Joissakin lantanidiesiintymissä sekundäärinen hydroterminen muuttuminen eli lantanidien uudelleenliikkuminen on ollut olennainen vaihe taloudellisesti merkittävän mineralisaation muodostumisessa (Williams-Jones et al. 2012). Esimerkiksi Dostal (2016) on esittänyt, että peralkalisiin graniitteihin liittyvissä REE-mineralisaatioissa primäärisen magmaattisen kiteytymisen kautta rikastuneet lantanidit voivat uudelleen mobilisoitua ja saostua myöhempien magmaattisten hydrotermisten fluidien vaikutuksesta. Tämä prosessi voi tuottaa sekundäärisen mineralisaation, joka voi olla rikkaampi kuin primääri magmaattinen mineralisaatio. Tämä aiheuttaa kivissä sen, että monet mineraalit ovat muodostaneet pseudomorfeja, joissa primääri magmaattinen mineraali on korvautunut sekundäärisillä mineraaleilla.

### **3.6. Lantanidimineraalit**

Lantanideja on tavattu sadoissa eri mineraaleissa, mutta malmimineraaleiksi niistä luetaan tällä hetkellä vain muutama. Taloudellisesti merkittävimmät ovat monatsiitti, basnäsiitti ja ksenotiimi (Weng et al. 2015). Tässä osiossa esitellään teoriataustaa Otanmäessä tavatuista lantanidimineraaleista.

#### **3.6.1. Monatsiitti**

Monatsiitti ( $\text{REEPO}_4$ ) on yleinen aksessorinen fosfaattimineraali graniiteissa ja sitä tavataan myös jonkun verran karbonaateissa ja metamorfisissa kivissä (Mariano ja Mariano 2012; Dostal et al. 2016; Verplanck et al. 2016). Monatsiittia on tuotettu paljon upaesiintymistä, usein muiden kaivannaisten sivutuotteena (Sengupta ja Van Gosen 2016). Upaesiintymien monatsiitti on yleensä suhteellisen Th-rikasta, kun

taas esimerkiksi karbonaateissa Th-pitoisuus on pieni, jolloin taloudellinen hyödyntäminen on helpompaa (Mariano ja Mariano 2012).

### 3.6.2. Nb-REE-Th-U-oksidiitit

Nb-REE-Th-U-oksidiimineraalit kuten pyrokloori, fergusoniiitti ja kolumbiitti ovat yleisiä graniittisissa pegmatiiteissa, mutta niitä tavataan myös A-tyypin ja I-tyypin graniiteissa (Ercit 2005). Koska Nb-REE-Th-U-oksidiitit sisältävät usein merkittäviä pitoisuuksia uraania ja toriumia, ovat ne usein voimakkaasti metamiktisiä, eli kiderakenteeltaan radioaktiivisessa hajoamisessa syntyneen säteilyn hajottamia, mikä tekee niistä myös usein alttiita rapautumiselle ja muuttumiselle (Ercit 2005). Nb-REE-Th-U-oksidiiden kemiallisen koostumuksen mukaisia yleisiä pääryhmiä ovat fergusoniiitti-, samarskiitti-, eukseniitti-, aeschyniitti-, pyrokloori- ja kolumbiitti-tantaliittiryhmät (Ercit 2005).

Pyrokloorin yksinkertaistettu kemiallinen kaava on  $(\text{Na,Ca,REE})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH,F})$ , mutta todellisuudessa mineraalissa voi olla lukuisia eri kationeja eri kationipaikoilla. Natriumia ja kalsiumia korvaavia alkuaineita voivat olla esimerkiksi Y, U, lantanidit ja  $\text{H}_2\text{O}$  kun taas niobiumia voi korvata esimerkiksi Ta ja Ti. Pyrokloori-ryhmässä tunnistetaan ainakin 20 eri päätejäsentä (Atencio 2010). Pyrokloori-ryhmän mineraalit esiintyvät pääosin kolmessa kivilajissa: karbonaatiitit, nefeliisisyeniiitit ja graniittiset pegmatiitit. Pyrokloori on tärkein Nb-malmimineraali maailman suurimmalla Nb-kaivoksella Araxássa Brasiliassa (Oliveira et al. 2001).

Fergusoniiitti-ryhmän kemiallinen kaava on  $[(\text{Y,REE,Ca,U,Th})(\text{Nb,Ta})\text{O}_4]$ . Fergusoniiittia esiintyy dolomiittisissa karbonaateissa, A-tyypin graniiteissa ja graniittisissa pegmatiiteissa (Möller et al. 1986). Fergusoniiittia on tavattu mm. sekundääristen ioniadsorptiosavi-esiintymien isäntäkivissä (Sanematsu ja Watanabe 2016).

Samarskiittiryhmän kemiallinen kaava on  $(\text{Yb,Y,REE,U,Th,Ca,Fe}^2)(\text{Nb,Ta,Ti})\text{O}_4$  (Warner ja Ewing 1993). Aeschyniitilla ja eukseniitilla on yhteinen yleinen



kemiallinen kaava, joka on  $(Y, \text{REE}, \text{Ca}, \text{U})(\text{Nb}, \text{Ti}, \text{Ta})_2\text{O}_6$ . Erona eukseniitilla ja aeschyniitilla on se, että aeschyniitti ottaa ensimmäisen kationin paikalle mieluummin suurempia kationeita (esim. LREE, Ca) ja eukseniitti pienempiä kationeita (esim. HREE, Y) (Ercit 2005).

### 3.6.3. Allaniitti

Allaniitti on epidoottiryhmän silikaattimineraali, jonka kemiallinen kaava on  $[(\text{REE}, \text{Ca}, \text{Y})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})]$ . Lantanidit korvaavat allaniitissa yleensä kalsiumia (Voncken 2015). Allaniitti voi sisältää sekä kevyitä että raskaita lantanideja, mutta yleensä allaniitissa esiintyy pääosin kevyitä lantanideja (Gieré ja Sorensen 2004). Allaniitille ei ole kehitelty taloudellisesti kannattavaa rikastusprosessia, eikä sen taloudellinen hyödyntäminen ole tällä hetkellä kannattavaa verrattuna monatsiittiin ja bastnäsiittiin, joissa on korkeampi lantanidipitoisuus ja jotka ovat alttiimpia kemialliselle hajoamiselle (Mariano ja Mariano 2012). Allaniitin  $\text{REE}_2\text{O}_3$ -pitoisuus harvoin ylittää 15 p.-% (Petrík et al. 1995). Allaniittia esiintyy pääasiassa graniitti-, granodioriitti-, montsoniitti- ja syeniitti-intruusioissa (Dollase 1971, 1973; Buda ja Nagy 1995; Broska et al. 2000; Voncken 2015). Allaniitti on yleinen mineraali erityisesti metalumiinisissa magmakivissä, jossa se esiintyy yleensä magnetiitin kanssa (Petrík et al. 1995; Broska et al. 2000).

### 3.6.4. Zirkoni

Zirkoni ( $\text{ZrSiO}_4$ ) on hyvin yleinen aksessorinen silikaattimineraali lukuisissa kivilajeissa ja taloudellisesti sitä on hyödynnetty mm. kassiteriitin, ilmeniitin, rutiilin ja kullan sivutuotteena upaesintymisissä (Sengupta ja Van Gosen 2016). Zirkonin kiderakenne suosii erityisesti raskaita lantanideja, mutta pitoisuus on harvoin suurempi kuin 1 p.-% (Finch ja Hanchar 2003).

### 3.6.5. REE-fluorokarbonaatit

REE-fluorokarbonaatit koostuvat bastnäsiitista  $[\text{REE}(\text{CO}_3)\text{F}]$  sekä kemiallisesti bastnäsiitista ja kalsiitin polymorfista vateriitista  $[\text{CaCO}_3]$  muuttuneiden mineraalien ryhmästä, joista yleisimmin tavattuja mineraaleja ovat parisiitti

[ $\text{REE}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$ ] ja synchysiitti [ $\text{REECa}(\text{CO}_3)_2\text{F}$ ] (Donnay ja Donnay 1953; Williams-Jones ja Wood 1993). REE-fluorokarbonaatit esiintyvät kivissä yleensä yhdessä ja eniten niitä on historiallisesti tavattu metamorfoosin ja paikoin myös hydrotermisen muuttumisen läpikäyneissä karbonaattikivissä (Olson et al. 1954; Andersen 1984, 1986). REE-fluorokarbonaatteja on tavattu myös peralkalisissa syeniiteissä ja graniiteissa (Williams-Jones ja Wood 1993). REE-fluorokarbonaatit ovat yleensä erittäin LREE-rikkaita, sisältäen yli 50 p.-% LREO, ja taloudellisesti tärkeimpiä lantanidimineraaleja maailmalla (Gysi ja Williams-Jones 2015). Esimerkiksi Bayan Obossa tuotetaan lantanideja pääasiassa bastnäsiitista (Verplanck et al. 2016).

### **3.7. Lantanidiesiintymien taloudellinen hyödyntäminen**

Lantanidien talteenottoa tehdään usein jonkun muun raaka-aineen tai metallien sivutuotteena (Long et al. 2010; Haque et al. 2014; Weng et al. 2015). Sivutuotteena kaivamiseen liittyy merkittävä riski saatavuudesta, koska sivutuotteiden kaivaminen on sidoksissa pääraaka-aineen hintoihin. Tästä on seurannut lähihistoriassa myös lantanidien hintojen voimakasta vaihtelua (Weng et al. 2015).

Suurin osa keveistä lantanideista tuotetaan bastnäsiitista ja monatsiitista ja raskaat lantanidit ksenotiimista ja ioniasorptiosavista (Linnen et al. 2014). Koska lantanidit ovat toistensa kanssa hyvin samanlaisia, on niiden rikastus hankalaa ja kallista. Lantanidit vaativat yleensä useita eri rikastusvaiheita kuten murskaus, vaahdotus, magneettinen erottelu, painovoimaerottelu, hydrometallurgia ja liuoserottelu (Weng et al. 2015).

## **4. LANTANIDIESIINTYMÄT SUOMESSA**

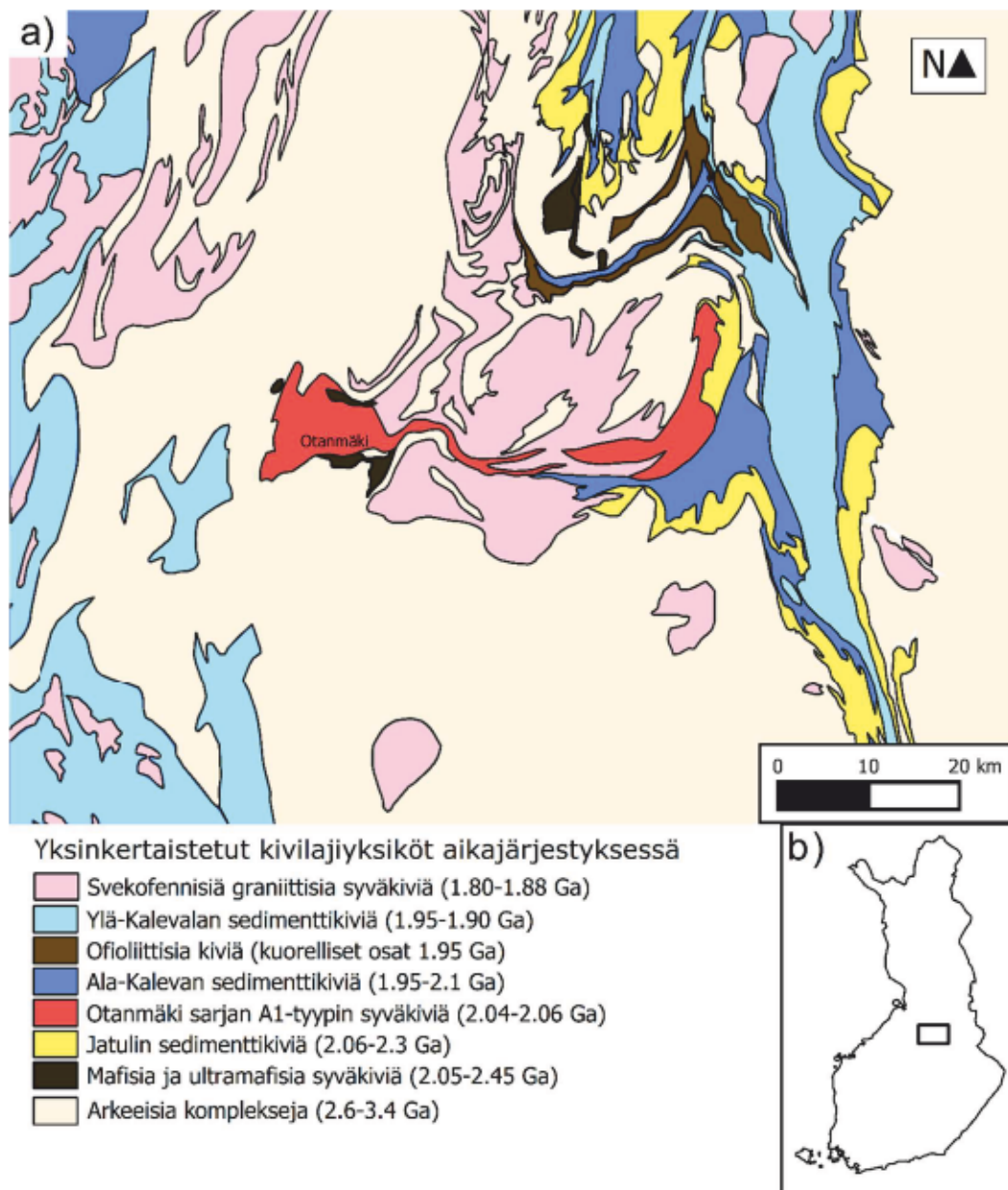
Yksinään taloudellisesti kannattavia lantanidiesiintymiä ei tällä hetkellä tunneta Suomesta, mutta 1960-luvulla lantanideja tuotettiin Kōrsnäsissä lyijykaivoksen sivutuotteena (Himmi 1975). Kriittisten metallien malmipotentiaalia alettiin tutkimaan uudestaan GTK:n toimesta vuosina 2009–2012 (Sarapää et al. 2013). GTK:n valtakunnallisessa pohjamaareenitietokannassa havaittiin alueellisia Y- ja La-anomaliaita esimerkiksi Pohjois-Suomen Tana-vyöhykkeellä Mäkäressä ja

Vaulossa, Keski-Lapin granitoidikompleksin alueella ja Etelä-Suomen rapakivigraniittialueella. Pohjamooreenin La-anomalioita havaittiin Soklin karbonaattikompleksilla, Korsnäsissä ja Otanmäellä (Sarapää et al. 2013). Korkeimmat kallioperästä tunnetut lantanidipitoisuudet ovat Korsnäsin Pb-lantanidikaivoksen karbonaattijuonissa (0.9 p.-%) ja Otanmäessä (2.4 p.%) (Sarapää et al. 2015). Taloudellisesti merkittävimmiksi lantanidimineralisaatioiksi todettiin Korsnäsin ja Otanmäen lisäksi Soklin karbonaatti, jossa lantanideja voitaisiin hyödyntää fosforin sivutuotteena (Sarapää et al. 2015). Lisäksi pienempiä kohonneita lantanidipitoisuuksia on tavattu mm. alkalikivissä Iiväärassa ja Lamujärvellä, rapakivigraniiteissa Eurajoella ja Kymissä, kaoliinissa Virtasalmella, Keski- ja Etelä-Suomen graniittisissa pegmatiiteissa ja hydrotermisissä sulfidiesiintymissä esim. Kuusamossa ja Peräpohjan alueella (Sarapää et al. 2013).

## **5. TUTKIMUSALUEEN GEOLOGISET PIIRTEET**

### **5.1. Alueen olennaisimmat geologiset tapahtumat**

Otanmäki sijoittuu arkeisen Karjalaisen kratonin lounaisrajalle, josta idässä ja koillisessa noin 20–50 km päässä sijaitsee Kainuun liuskejakso ja lännessä ja luoteessa noin 20–75 km päässä sijaitsee paleoproterootsoisen Svekofennisen alueen ja Karjalaisen arkeisen kratonin tektoninen kontakti. Kuvassa 2 on esitetty yksinkertaistettu kallioperäkartta Otanmäen läheisyydessä.



Kuva 2. a) Yksinkertaistettu geologinen kartta tutkimusalueesta johon kuvattu Otaňmäen alueen sijainti ja b) geologisen kallioperäkartan sijoittuminen Suomen kartalla. Kartta (a) pohjautuu DigiKP:hen, Geologian tutkimuskeskuksen digitaaliseen karttapalveluun. Saatavilla <https://gtkdata.gtk.fi/Kalliopera/index.html>, sivulla vierailtu 06/2020).

Tutkimusalueen geologiaan vaikuttaneet neljä merkittävintä tapahtumaa ovat 1) arkeisen kratonin muodostuminen 3400–2680 miljoonaa vuotta sitten ja stabiloituminen noin 2680 miljoonaa vuotta sitten, 2) kratonin ajoittainen ja paikallinen venyminen aikavälillä 2680–2100 miljoonaa vuotta sitten, 3) kratonin repeäminen aikavälillä 2100–2050 miljoonaa vuotta sitten, ja 4) svekofenninen orogenia aikavälillä 1920–1770 miljoonaa vuotta sitten (Nironen 2017). Arkeisen kratonin stabiloitumisen jälkeen, noin 2.6 miljardia vuotta sitten, arkeinen kratoni kävi läpi useita ekstensiovaiheita, joihin liittyi mafista magmatismia ja vulkanismia



sekä sedimentaatiota useassa kehitysvaiheessa, joita ovat Sumi-Sariola, Jatuli ja Kaleva. Kainuun liuskejaksolla Otanmäen läheisyydessä esiintyvät sedimenttikivet kuuluvat pääosin Jatulin ja Kalevan kerrostumiin. Viimeinen näistä jaetaan Ylä- ja Ala-Kalevaan (Laajoki 2005). Jatuli edustaa pääosin rauhallisia tektonisia olosuhteita ja yksikölle tyypillisten hiekkakivien kerrostuminen on tulkittu tapahtuneen mantereisissa oloissa aikavälillä 2300–2060 miljoonaa vuotta sitten (Laajoki 2005; Hanski & Melezhik 2013) kun taas Ala-Kalevan syvänmeren sedimentit edustavat vaiheittaista siirtymistä mantereisesta repeytymisestä merelliseen kerrostumisympäristöihin aikavälillä 2100–1900 miljoonaa vuotta sitten (Lahtinen et al. 2010; Nironen 2017). Jatulin ja Ala-Kalevan detritus on pääasiassa arkeista (Lahtinen et al. 2010). Jatulin aikana ja sen jälkeen, eli n. 2060 miljoonaa vuotta sitten, alkoi aika, jolloin saivat alkunsa Otanmäen taloudellisesti kiinnostavimmat kivilajiyksiköt, eli noin 2060 miljoonan vuoden ikäiset Otanmäen gabro-intruusiot, joihin liittyy Fe-Ti-V-oksidimalmeja (Kuivasaari et al., 2012; Huhma et al., 2018). Lisäksi Otanmäen alueelta tunnetaan 2040–2060 miljoona vuoden ikäisiä Otanmäki sarjan A1-tyypin intermediäärisiä syväkiviä sekä peralumiinisia ja peralkalisia graniitteja (Kärenlampi et al. 2019), joista jälkimmäiseen liittyvät Otanmäen alueelta tunnetut Kontioahon ja Katajakankaan Nb-Zr-REE-mineralisaatiot (Kärenlampi et al. 2020). Otanmäki sarjan intruusioden on todettu edustavan arkeisen kratonin repeämisen varhaista vaihetta, jossa repeäminen on edennyt hyvin hitaasti (Kärenlampi et al. 2019). Litosfäärin lopullinen repeäminen noin 2050 miljoonaa vuotta sitten on todennäköisesti toiminut lähtölaukauksena mannerreunuksen ja uuden merellisen altaan avautumiselle, joka johti lopulta merellisen altaan ja uuden merenpohjan muodostumiseen noin 1950 miljoonaa vuotta sitten kun Jormua ofioliitti muodostui (Kärenlampi et al. 2019).

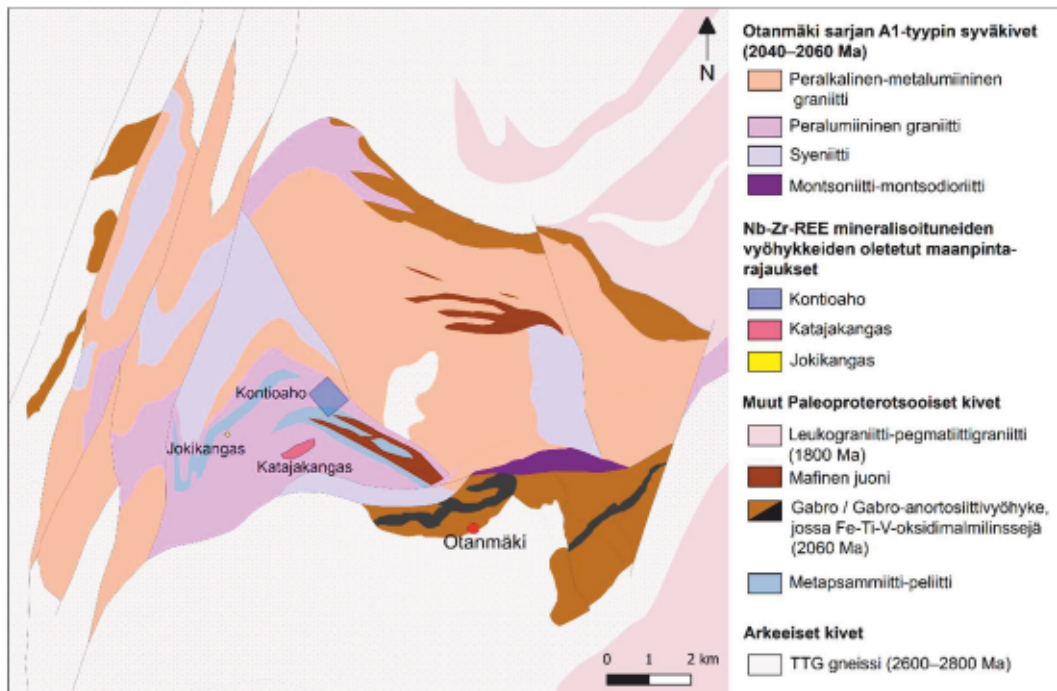
Svekofenninen orogenian uskotaan alkaneen noin 1920 miljoonaa vuotta sitten ja päättyvän noin 1770 miljoonaa vuotta sitten (Lahtinen et al. 2005). Svekofennisessä vuorijononpoimutuksessa oli useita poimuttumis- ja siirrostumisvaiheita, joiden seurauksena Karjalaisen arkeisen kratonin länsireuna peittyi svekofennisen ylityöntökompleksin alle (Lahtinen et al. 2010). Nykyisessä eroosiotasossa esiintyvien kivilajien on arveltu hautautuneen 15–20 km:n syvyyteen (Kontinen et al. 1992, 2013; Tuisku 1997; Korsman et al. 1999; Pajunen ja Poutiainen 1999;



Kontinen 2002; Kontinen ja Paavola 2006; Lahtinen et al. 2010, 2015). Svekofennisen orogeenin vaikutukset ovat nähtävissä Otanmäen voimakkaasti hiertyneissä ja suuntautuneissa kivissä (Kärenlampi et al. 2019). Alueen nuorinta magmatismia edustaa Kajaanin graniitti, jonka iäksi on arvioitu 1820–1800 miljoonaa vuotta (Vaasjoki et al. 2001).

## 5.2. Otanmäki sarjan A1-tyyppin syväkivet

Otanmäki sarjan A1-tyyppin syväkivet esiintyvät noin 60 km pitkässä itä-länsisuuntaisessa napessa, eli ylityöntölaatatassa, arkeisen kratonin, Otanmäen gabro-intruusioiden, Kajaanin graniitin ja Kainuun liuskejakson ympäröimänä (Kuva 2). Otanmäen A1-tyyppin kivien on todettu olevan siirroskontaktissa arkeisen kratonin ja Kainuun liuskejakson kanssa (Kärenlampi et al. 2019). Otanmäen alueella esiintyviä A1-tyyppin syväkiviä ovat: 1) peralkalinen-metalumiininen graniitti, 2) peralumiininen graniitti, 3) syeniitti ja 4) montsoniitti-montsodioriitti (Kuva 3).



Kuva 3. Otanmäen alueen geologinen kartta johon merkitty Kontioahon, Katajakankaan ja Jokikankaan Nb-Zr-REE mineralisoituneiden vyöhykkeiden ja Otanmäen kylän sijainti (punainen pallo) (kartta: Kimmo Kärenlampi).

Katajakankaan ja Kontioahon REE-Zr-Nb-mineralisoituneiden vyöhykkeiden isäntäkivi on peralumiininen montsograniitti (Kuva 3), jonka ikä on noin 2060

miljoonaa vuotta ja joka sulkee sisäänsä useiden kilometrien pituisia turbidiittisia metasedimenttejä ja isäntäkiven foliaation kanssa samansuuntaisia metadiabaasijuonia (Kärenlampi et al. 2019, 2020). Otanmäen alueen lantanidimineralisaatioiden synty on yhdistetty alueella esiintyvään peralkaliseen alkalimaasälpägraniittiin, jonka iäksi on arvioitu 2040–2050 miljoonaa vuotta (Kärenlampi et al. 2020). Näiden graniittisten sulien kehitys on tulkittu alueella tapahtuneen niin, että peralkalinen magma on ektensiivisen fraktioitumisen seurauksena erkaantunut muusta magmasta ja jättänyt jäljelle piirikkaita, metalumiinisia ja REE-, Zr-, Nb-, Th-, U-, Ca- ja Fe-rikkaita jäännössulua suhteessa alkuaineisiin Na, K ja Al. Lantanidien rikastumista myöhäisiin jäännössuliin edesauttoivat fluoridi-, karbonaatti- ja sulfaattikompleksit. Nämä piirikkaat, metalumiiniset jäännössulat ovat muodostaneet montsograniittiin tunkeutuneita juonia ja laattamaisen intruusion, joita Katajakankaan ja Kontioahon mineralisoituneet vyöhykkeet edustavat. Mineralisoituneiden vyöhykkeiden Nb-REE-Th-U-kantajamineraaleissa on todettu tapahtuneen Svekofennisen orogeenian aikana noin 1900–1800 miljoonaa vuotta sitten kemiallista uudelleentasapainottumista (Kärenlampi et al. 2020).

Katajakankaan mineralisaatio esiintyy montsograniittiin tunkeutuneina 0.1–1.4 metriä paksuina juonina, kun taas Kontioaho esiintyy montsograniitissa 30–50 metriä leveänä laattamaisena kerroksena (Kärenlampi et al. 2020). Katajakankaan mineralisaation mineraloginen koostumus on pääosin tummaa hienorakeista kvartsia, kun taas Kontioahossa tavataan kvartsin lisäksi kalimaasälpää, albiittia ja magnetiittia. Molemmissa mineralisaatioissa tavataan samoja lantanidimineraaleja, joita ovat mm. allaniitti-(Ce), titaniitti, zirkoni ja Nb-REE-Th-U-oksidi (Kärenlampi et al. 2020). Katajakankaan mineraalivaroiksi on arvioitu 150 m syvyyteen 0.5 miljoonaa tonnia @ 2.7 p.-% TREO, 0.76 p.-% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ja 1.13 p.-% ZrO<sub>2</sub> (Hugg 1985a). Kontioahon mineraalivaroiksi on arvioitu 250 m syvyyteen 4 miljoonaa tonnia @ 0.68 p.-% TREO, 0.12 p.-% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 2,8 p.-% ZrO<sub>2</sub> (Hugg 1985b). Lisäksi Rautaruukki Oy:n malminetsintätutkimuksissa Jokikankaalla, noin 1.5 km päässä Katajakankaan mineralisaatiosta luoteeseen (Kuva 3), tavattiin kaksi Katajakankaan mineralisaation kanssa samanlaista kvartsirikasta lantanidimineralisoitunutta juonta, joissa Nb-pitoisuus todettiin olevan noin 800 ppm ja TREE-pitoisuuden noin 4500 ppm (Hugg 1985c).

## 6. AIKAISEMMAT TUTKIMUKSET

GTK:n ja Rautaruukki Oy:n 1980-luvulla suorittamiin malminetsintätutkimuksiin Otamäen alueella sisältyi lohkar-etsintää, kallioperäkartoitusta, moreenigeokemiallisia tutkimuksia, geofysikaalisia maastomittauksia ja timanttikairasta. Lohkareita löydettiin yhteensä 284, joista tehtiin kokokivianalyysit ja lohkaraviuhkoja todettiin ainakin neljä. Jäätikön kuljetussuunnaksi lohkarille todettiin noin 315 astetta (Hugg ja Heiskanen 1986; Äikäs 1990). Geofysikaalisissa tutkimuksissa todettiin, että Otanmäen lantanidimineralisoituneet kivet erottuvat muista alueen kivistä geofysikaalisilta ominaisuuksiltaan kohonneen radioaktiivisuuden perusteella (Hugg ja Heiskanen 1986). Lisäksi Kontioahon mineralisaatiossa magneettinen susceptibiliteetti todettiin selvästi ympäristöään voimakkaammaksi johtuen korkeasta magnetiittipitoisuudesta (Äikäs 1990; Lahti et al. 2018).

Otanmäki Mine Oy on tehnyt alueella lohkar-etsintää vuosina 2016–2018 ja geofysikaalisia mittauksia kesällä 2019. Kimmo Kärenlampi on tehnyt alueella kallioperäkartoitusta väitöskirjatutkimukseensa vuosina 2016–2018 (Kärenlampi et al. 2019, 2020) ja tutkinut Rautaruukki Oy:n timanttikairasydämistä tehtyjä ohuthieitä mikroskooppisilla menetelmillä sekä hyödyntänyt muuta aiemmin kerättyä GTK:n ja Rautaruukin raportoimaa dataa alueelta tutkimuksessaan.

## 7. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tätä tutkimusta varten saatiin Otanmäki Mine Oy:ltä 230 näytettä Otanmäen alueelta vuosina 2016–2018 löytyneistä lohkarista, joissa on kohonnut radioaktiivisuus ja kohonneita lantanidi-, Nb- ja Zr-pitoisuuksia. Esitutkimuksena näytteistä tutkittiin kemiallinen koostumus kannettavalla XRF spektrometrillä (Liite 1) ja mitattiin magneettinen susceptibiliteetti, sekä osasta lohkarista myös tiheys ja radioaktiivisuus lyijykammiossa (Liite 2). Jatkotutkimusvaiheessa valittiin yhteensä 19 kpl eri lohkaretyyppejä edustavaa näytettä, joista teetettiin kiilloitetut ohuthieet ja kokokivikoostumus analysoitiin tarkasti laboratoriossa. Kiilloitetuista



ohuthiestä tutkittiin näytteiden mineraloginen koostumus ja mineraaligeokemiaa elektronimikroskoopilla.

REE-Nb-Zr-mineralisoituneet lohkareet paikannettiin niiden kohonneen radioaktiivisuuden perusteella. Lohkare-etsinnässä käytettiin gammasäteilyä mittaavia kenttäskintillometrejä: Scintrex BGS-3 ja Georadis GT-40. Skintillometrit mittaavat havaitsemansa gammasäteilyn yksikkönä pulssia per sekunti (engl. counts per second, cps). Lohkare-etsinnässä käytettiin laitekohtaisia raja-arvoja 300 cps (BGS-3) ja 1000 cps (GT-40), joiden ylittyessä lohkareta pidettiin anomaalisena. Tällä tavalla kohonneen radioaktiivisuuden omaavat lohkareet pystyttiin paikantamaan alle metrin päässä mittalaitteesta ja maksimissaan 50 cm syvyydeltä maapeitteen alta. Syvemmällä maapeitteen alla olevia lohkareita ei pystytty löytämään tällä menetelmällä, koska 50 cm paksuampi maapeite absorboi säteilyn. Paikannettu lohkare joko otettiin mukaan sellaisenaan tai siitä vasaroitiin edustava näyte, jos lohkare oli liian suuri kannettavaksi. Kaikista lohkareista kerättiin niiden löytöpaikan koordinaatit, löytöpaikan nimi ja koko. Tämän lisäksi lohkareista kerättiin vaihtelevasti minimi ja maksimi gammasäteilypulssit per sekunti, lohkareen muoto, löytöympäristö ja -syvyys, ympäröivä maalaji, rakenne, raekoko, rapautuneisuus, rapaumapinnan ja murtopinnan väri ja lyhyt kuvaus (Liite 3).

Esitutkimusvaiheessa lohkarenäytteiden kemiallinen koostumus tutkittiin kannettavalla Hitachi Hi-Tech X-MET 8000 XRF-spektrometrillä (engl. x-ray fluorescence). Mittaukset tehtiin käyttäen laitevalmistajan tehdaskalibrointeja, joilla pystyttiin mittaamaan Si, Al, Ti, Fe, Mn, Mg, Ca, K, P, S, Nb, Ta, Zr, Hf, Y, La, Ce, Pr, Nd, Th, U, Cr, Ni, Co, V, Sc, Cu, Zn, Ba, Sr, Rb, Ga, Mo, Pb, Sb, As, Cd, Sn, W, Ag, Bi, Au, Pt ja Pd. Mittaukset tehtiin näytteiden pinnasta timanttisahalla leikatulta tasaiselta pinnalta. Yksittäisen mittauksen kesto oli 60 s. Tekstuuriltaan homogeenisille näytteille tehtiin mittauksia 4 kpl ja heterogeenisille 6-12 kpl ja tuloksista laskettiin keskiarvo jokaiselle alkuaineelle. Kannettavan XRF-spektrometrin mittaustarkkuutta arvioitiin vertailemalla tuloksia laboratoriossa teetettyihin totaaliliuotus tuloksiin. Vertailu osoitti, että kannettavalla XRF-spektrometrillä saatujen tulosten vastaavuus on hyvä alkuaineille Si, Al, K, Ca, Fe, La, Ce, Nd, Nb, Zr ja Th (Liite 4). Tämän vuoksi



tässä tutkimuksessa kannettavan XRF-spektrometrin mittaustuloksia hyödynnettiin lohkareiden kemiallisessa vertailussa. Vertailu myös osoitti, että fosforille saatiin anomaalisen korkeita pitoisuuksia näytteistä, joissa on korkeat Zr-pitoisuudet, mikä voi johtua kyseisten alkuaineiden päällekkäisistä spektreistä mittauksissa. Tämän vuoksi kannettavalla XRF-spektrometrillä mitattua fosforia ei huomioitu tutkimuksessa.

Lohkarenäytteistä teetettiin 17 pää- ja hivenalkuaineanalyysiä (Liite 5) Bureau Veritaksen geolaboratoriossa (Vancouver, Kanada). Näytteiden esikäsittely tehtiin Oulun yliopistossa. Esimurskaus tehtiin kartiomurskaimella, jonka kulutusteräs on mangaaniterästä. Pulverisointi suoritettiin huolellisesti puhdistetulla wolframikoboltti-karbidi rengasmyllyllä. Analyysit tehtiin noudattaen BV:n protokollaa LF200, johon kuului näytepulverien litiumboraattifuusio ja liuottaminen typpihappoon ( $\text{HNO}_3$ ) ja analyysi induktiivisesti kytketyllä plasma-optinen emissiospektrometrillä (ICP-OES) ja induktiivisesti kytketyllä plasma-massaspektrometrillä (ICP-MS). ICP-OES-menetelmällä analysoitiin pääkomponentit  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  ja  $\text{TiO}_2$  sekä hivenalkuaineet Ni ja Sc. ICP-MS-menetelmällä analysoitiin hivenalkuaineet Ba, Be, Ce, Co, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, W, Y, Yb ja Zr. Totaali rikki- ja hiilipitoisuus määritettiin LECO-analysaattorilla (protokolla TC003) ja fluoripitoisuus fluoridiselektiivisellä elektrodilla (protokolla GC841). Bureau Veritakseen lähetettyjen näytteiden joukossa oli kaksi sertifioitua referenssimateriaalia (GSP-2 ja REE-1), joiden analyysitulokset vastaavat hyvin referenssimateriaaleilla annettuja alkuaineiden konsentraatioita (Liite 6). Lisäksi tässä tutkimuksessa käytettiin Rautaruukki Oy:n raportoimia lohkareiden pääalkuaine- ja hivenalkuaineanalyysijä, jotka on tehty vuosina 1982–1985 Philips PW1480 XRF spektrometrillä jauhebriketeistä. XRF-spektrometrin mittaustulokset ovat liitteessä 7.

Magneettisen susceptibiliteetin mittaukset tehtiin Geofyzika/Agico KT-6 Kappameter käsitteillä mittalaitteella. Susceptibiliteetin mittauksia tehtiin 5 kpl/näyte tasaisesti eri kohdista näytettä. Lohkarekantaan merkittiin mittauksien

mediaanitulos ja tulosten vaihteluväli ( $10^{-3}$  SI yksikköä). Radioaktiivisuus mitattiin Georadis GT-40 skintillometrillä lyijykammiossa, jotta saatiin minimoitua taustasäteilyn aiheuttama vaikutus mittaustulokseen. Lisäksi mitattu näyte punnittiin vaa'alla, jotta näytteille saatiin vertailukelpoinen säteilymittaus niin että säteilyn määrä pystyttiin suhteuttamaan näytteen painoon (cps/kg). Näytteiden tiheys mitattiin ensin punnitsemalla ne kuivana yläkuppivaa'alla ja sen jälkeen ne punnittiin vapaana vedessä roikkuvassa telineessä, joka roikkui vaa'an pohjasta. Saatuja massoja käytettiin tiheyden laskemisessa. Tiheys laskettiin kaavalla:

$$\rho = \frac{m_k}{m_k - m_m}$$

Jossa  $\rho$  = tiheys (g/cm<sup>3</sup>)

$m_k$  = kuivapaino (g)

$m_m$  = märkäpaino (g)

Lohkarenäytteiden mineraloginen koostumus tutkittiin kiilloitetuista ohuthiestä JEOL JSM-7100F kenttäemissio-pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (GTK, Espoo), joka oli varustettu Oxford Instrumentsin energiadiispersiivisellä (EDS) röntgenilmaisimella. Näytteet analysoitiin puoliautomaattisella skannausmoodilla (Feature grain X-ray mapping). Mittausolosuhteet pidettiin vakiona: kiihtyvyydjännite 20 kV ja virta 1.3 nA. Keskimääräinen ohuthiemittaus koostui 125 satunnaisesti valitusta ruudusta, joista jokaisesta tehtiin noin 80 EDS mittausta (n. 10 000 mittauspistettä per näyte). Ruudun resoluutio oli 5.88 µm/pikseli. Saadut tulokset prosessoitiin Oxford Instrumentsin Inca-tietokoneohjelmalla versiolla 5.05. Prosessoinnissa jokainen mittauspiste luokiteltiin sen koostumusta vastaavan mineraalin luokkaan (Liite 8).

Lantanidimineraalien aallonpituusdispersiivisiä (WDS, wavelength dispersive spectrometry) koostumusanalyysyjä tehtiin Oulun yliopiston JEOL JXA-8200 röntgenmikroanalysaattorilla. Mittauksissa analysoitiin alkuaineet Si, Ca, Al, Fe, K, Na, Mn, Ti, P, F, Cl, Zr, Hf, Nb, Th, U, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb. Analysointiolosuhteet olivat seuraavat: kiihtyvyydjännite 20 kV, elektronisäteiden virranvoimakkuus  $1.4 - 1.6 \times 10^{-8}$  nA ja läpimitta 0–10 µm.

Standardeina käytettiin monatsiittia ja synteettistä zirkoniaa. Standardianalyysien vastaavuus oli hyvä verrattuna annettuihin referenssikoostumuksiin (Liite 9). Mikroanalyysien tulokset löytyvät liitteestä 10.

## 8. TULOKSET

### 8.1. Lohkareiden luokittelu

Lohkareet voidaan luokitella niiden mineraalikoostumuksen perusteella seuraavasti: 1) kvartsigneissi, 2) kvartsimaasälpägneissi, 3) egiriinigraniittigneissi, 4) toriittigneissi ja 5) amfibolifluoriittigneissi (Taulukko 1). Taulukosta 1 voi myös nähdä, että kaikista löydettyistä lohkareista yhteensä 95% vastaa tyyppejä 1 ja 2.

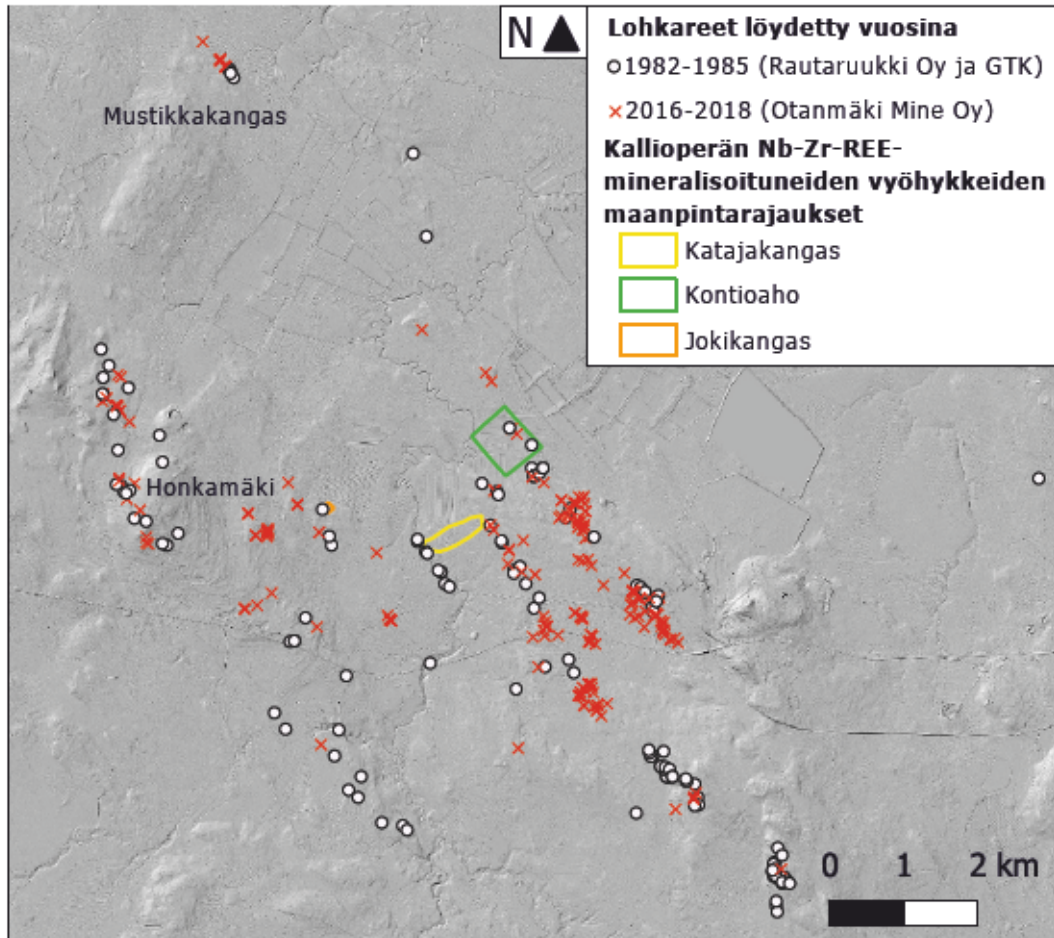
Taulukko 1. Otanmäen alueelta löydettyjen lohkareiden luokittelu ja mineralogiset ominaispiirteet.

Tyyppi	Harme-mineraalit	Nb-REE-Th-U kantajamineraalit	Murtopinnan väri ja rakenne	% osuus kaikista lohkareista
1	Kvartsi	Allaniitti, Nb-REE-U-Th-oksidi, REE-fluorokarbonaatti, zirkoni, titaniitti	Vaalean tai tummanharmaa, tummia tai lähes mustia allaniittiraitoja	50%
2	Kvartsi, maasälvät, magnetiitti	Allaniitti, REE-fluorokarbonaatti, Nb-REE-U-Th-oksidi, zirkoni, titaniitti	Punertava kvartsimaasälpä matriksi, jossa tummia magnetiitti ja/tai allaniittiraitoja.	45%
3	Kvartsi, maasälvät, egiriini	Zirkoni, Nb-REE-U-Th-oksidi, REE-fluorokarbonaatti, allaniitti, monatsiitti, titaniitti	Punertava graniittinen matriksi, jossa tummempia egiriini-arfvedsoniittiraitoja sekä ruskeita Nb-Zr-REE mineralisoituneita kvartsijuonia.	2%
4	Kvartsi, maasälvät, magnetiitti	Toriitti, allaniitti, monatsiitti, REE-fluorokarbonaatti, zirkoni	Punertava, kalimaasälpä, kvartsi- ja toriitti-rikas matriksi, jossa magnetiitti ja allaniitti esiintyvät raitoina tai kasaamina.	2%
5	Fluoriitti, amfiboli, kvartsi	Allaniitti, Nb-REE-U-Th-oksidi, zirkoni	Vuorottelevia tummanvihertäviä amfiboliraitoja ja violetteja fluoriittiraitoja.	1%

### 8.2. Lohkareiden löytöpaikat

Lantanideista mineralisoituneiden lohkareiden esiintymisalue rajoittuu Otanmäessä n. 12 x 12 km kokoiselle alueelle (Kuva 4). Kuvassa 4 on eritelty vuosina 1982–1985 sekä vuosina 2016–2018 paikannetut lohkareet. Kuva 4 osoittaa, että päällekkäisyyttä lohkareiden löytöpaikkojen välillä on vähän, vain noin kymmenen lohkareen koordinaatit ovat kuvassa selvästi päällekkäin, kun lohkareita on yhteensä noin 350.

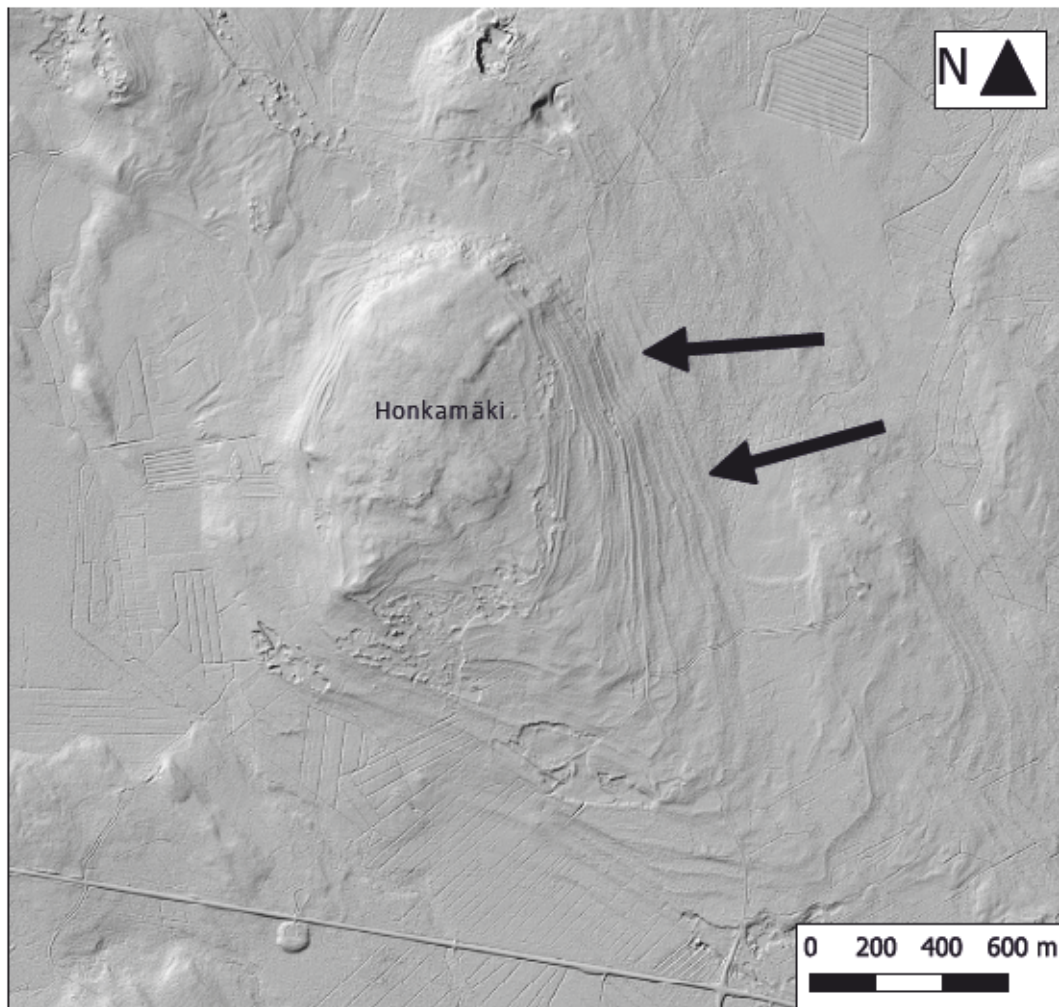




Kuva 4. Otanmäen alueelta vuosina 1982–1985 ja 2016–2018 paikannettujen REE-Nb-Zr-mineralisoituneiden lohkareiden löytöpaikat ja kallioperästä tunnettujen Nb-Zr-REE-mineralisoituneiden vyöhykkeiden maanpintarajaukset (Hugg ja Heiskanen 1986; Kärenlampi et al. 2020). Taustakarttana rinnevarjostuksena esitetty korkeusmalli (Maanmittauslaitos, rinnevarjostusaineisto 2015).

Lohkareiden tyypillisin löytöpaikka on läheltä maanpintaa, maksimissaan n. 30 cm syvyydestä, joko kasvillisuuden alla, louhikoissa tai ojien pohjalla. Vallitsevana maalajina löytöpaikoissa on moreeni. Honkamäen alueella on laserkeilausaineistoon perustuvassa korkeusmallissa nähtävillä myös jäätiköitymistä seuranneen sulamisvaiheen aikana syntyneitä rantamuodostumia (Kuva 5).

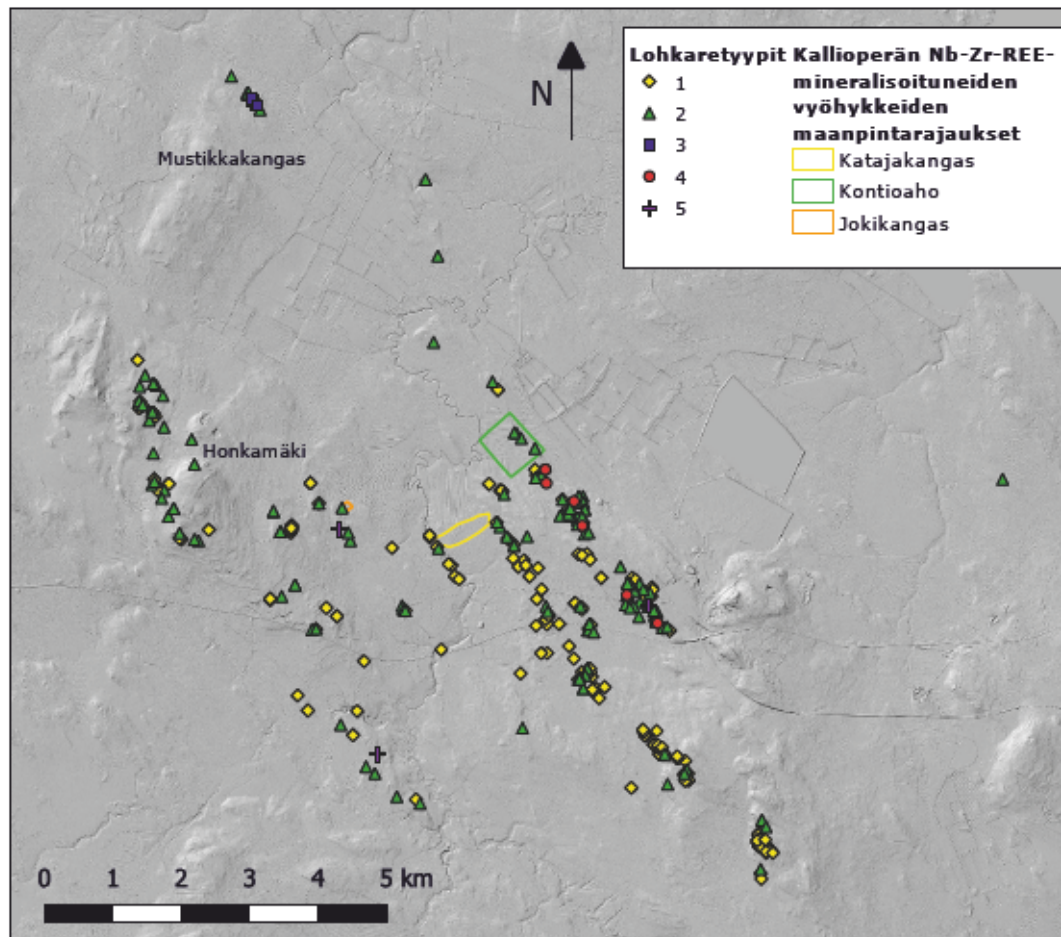




Kuva 5. Honkamäen alueen rantamuodostumia rinnevarjostuksena esitetyssä maaperän korkeusmallissa (Maanmittauslaitos, rinnevarjostusaineisto 2015).

Lohkareet muodostavat kolme pitkää ja katkonaisilta vaikuttavaa pääviuhkaa, joista kaksi alkaa tunnetuista Katajakankaan ja Kontioahon mineralisaatioista ja kolmas Honkamäen pohjoispuolelta (Kuva 6). Pääviuhkojen pituudet ovat noin 7.8 km (Honkamäki), 7 km (Katajakangas) ja 4.4 km (Kontioaho). Pääviuhkojen lisäksi alueella on myös muutamia pienempiä viuhkoja tai yksittäisinä löytyneitä lohkaraita, joissa on korkeat lantanidipitoisuudet, mutta niiden löytöpaikka poikkeaa merkittävästi muista viuhkoista tai tunnetuista esiintymistä. Pienempiä viuhkoja on esimerkiksi Mustikkakankaalla noin 5 km päässä luoteessa Kontioahosta, Katajakankaan ja Kontioahon välissä sekä Honkamäen ja Jokikankaan välissä (Kuva 6).

Katajakankaan viuhkassa lohkareet edustavat pääosin tyyppiä 1 ja Kontioahon viuhkassa tyyppiä 2 (Kuva 6). Lisäksi kaikki tyyppin 4 lohkareet asettuvat Kontioahon viuhkaan. Honkamäen viuhkassa vallitseva on tyyppi 2. Tyyppin 3 lohkareiden esiintyminen on keskittynyt ainoastaan Mustikkakankaan viuhkaan. Tyyppin 5 lohkareet ovat hajaantuneet Jokikankaan eteläpuolelle sekä Kontioahon viuhkaan.



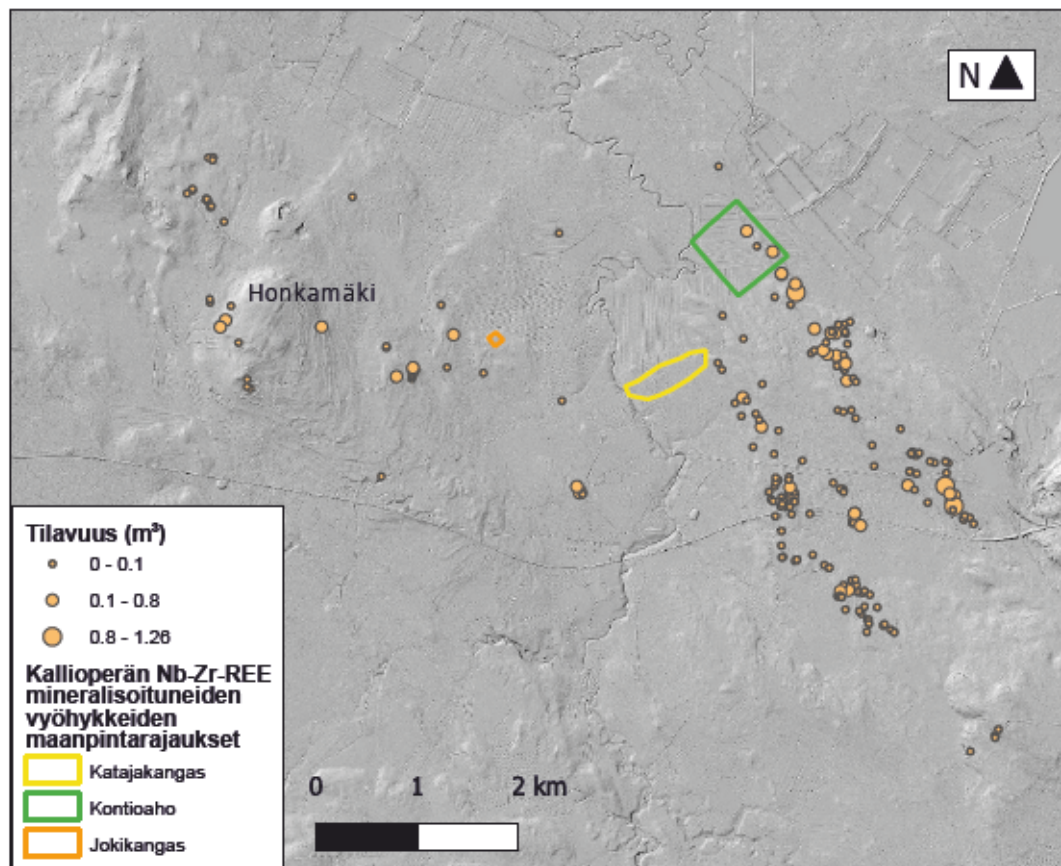
Kuva 6. Otanmäen alueelta löydettyjen Nb-Zr-REE mineralisoituneiden lohkareiden löytöpaikat, lohkareiden luokittelu tyypeihin 1–5 kemiallisen koostumuksen perusteella ja kallioperästä tunnettujen Nb-Zr-REE mineralisoituneiden vyöhykkeiden maanpintarajaukset (Hugg ja Heiskanen 1986; Kärenlampi et al. 2020). Taustakarttana rinnevarjostuksena esitetty korkeusmalli (Maanmittauslaitos, rinnevarjostusaineisto 2015).

### 8.3. Lohkareiden fysikaaliset ominaisuudet

Otanmäen alueen Nb-Zr-REE-mineralisoituneet lohkareet ovat muodoltaan pääasiassa kulmikkaita tai vain vähän kulmistaan pyöristyneitä. Lohkareiden suurimman mittasuhteen pituus vaihtelee välillä 0.1–1.7 m ja keskimääräinen koko on noin 0.5x0.3x0.3 m. Tyyppien 1–3 lohkareet ovat pääosin samankokoisia ja vastaavat hyvin kaikkien lohkareiden keskimääräistä kokoa. Suurimmat lohkareet ovat pisimmältä sivultaan yli metrin mittaisia, esiintyvät pääosin Kontioahon



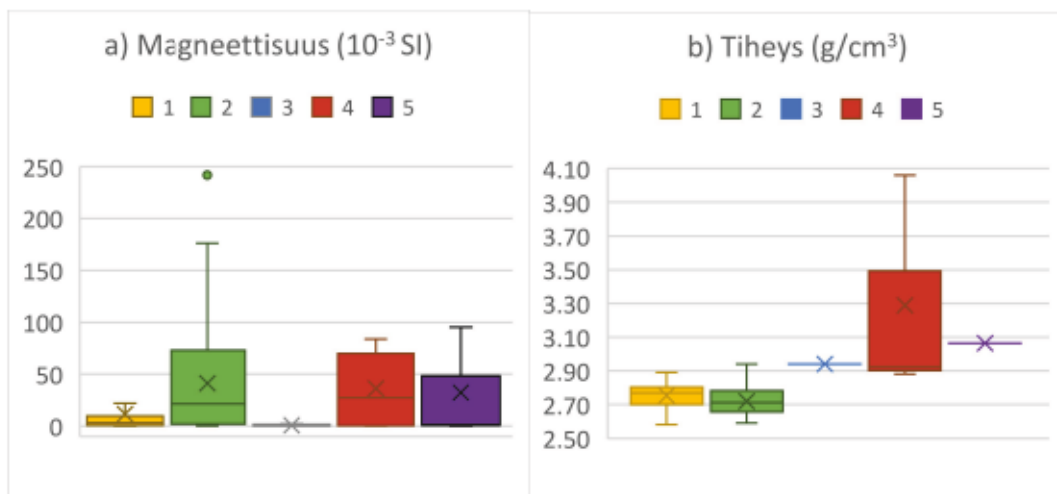
viuhkassa ja vastaavat tyyppiä 2. On syytä huomata, että näitä suuria lohkkareita on löydetty vain muutamia. Tyyppin 4 lohkkareet ovat selkeästi pienempiä kuin muut alueelta löydetty lohkkareet, niiden pisimmän sivun pituus vaihtelee välillä 0.05–0.20 m. Tyyppin 5 lohkkareista on saatavilla mittasuhteet vain kahdesta lohkkareesta, joissa pisimmät sivut ovat 0.35 ja 0.70 m. Lohkkareiden tilavuudet laskettuna lohkkareiden mitoista kuvassa 7 paljastavat, että sekä Kontioahon, että Katajakankaan viuhkassa lohkkareiden koko kasvaa viuhkojen keskellä ja tällöin suurempia lohkkareita on useita vierekkäin. Lisäksi viuhkat selkeästi ”katkeavat” kohdissa, joissa lohkkareiden koko ja lukumäärä kasvaa.



Kuva 7. Nb-Zr-REE mineralisoituneiden lohkkareiden löytöpaikat ja tilavuudet Kontioahon, Katajakankaan ja Honkamäen viuhkoissa ja Otanmäen alueen kallioperästä tunnettujen Nb-Zr-REE mineralisoituneiden vyöhykkeiden oletetut maanpintarajaukset (Hugg ja Heiskanen 1986; Kärenlampi et al. 2020). Taustakarttana rinnevarjostuksena esitetty korkeusmalli (Maanmittauslaitos, rinnevarjostusaineisto 2015).

Magneettinen susceptibiliteetti lohkkarenäytteissä vaihtelee välillä  $0\text{--}242 \times 10^{-3}$  SI ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ). Korkeimmat magneettisuusarvot ( $>100 \times 10^{-3}$  SI) mitattiin tyyppin 2 lohkkareista, mikä johtuu tämän tyyppin lohkkareiden sisältämästä magnetiitista, mutta tyyppi 2 sulkee sisäänsä myös epämagneettisia lohkkareita. Kohonneen

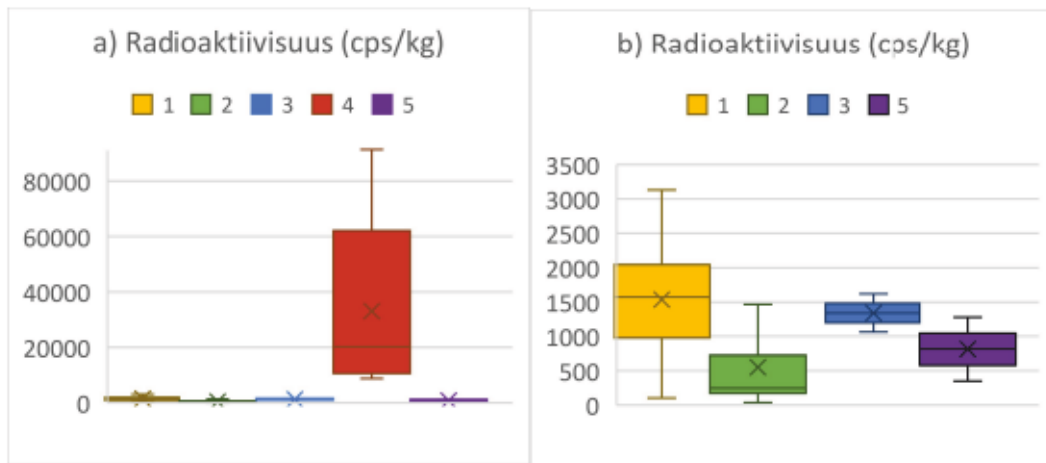
magneettisen susceptibiliteetin näytteillä on yleensä myös hieman korkeampi tiheys. Tyypin 2 lohkareissa, joissa magneettisuus ylittää arvon  $100 \times 10^{-3}$  SI on tiheys keskimäärin  $2.76 \text{ kg/cm}^3$ , kun kaikkien lohkareiden tiheysarvot vaihtelevat välillä  $2.56\text{--}4.06 \text{ kg/cm}^3$  ja keskiarvo on noin  $2.74 \text{ kg/cm}^3$ . Korkeimmat tiheydet ( $>2.9 \text{ kg/cm}^3$ ) ovat muutamilla yksittäisillä lohkareilla, joissa on tavattu erittäin paljon joko toriumia ( $>5 \text{ p.-%}$ ), fluoriittia ( $>40 \text{ p.-%}$ ), zirkonia ( $>10 \text{ p.-%}$ ) tai lantanideja ( $>3 \text{ p.-%}$ ). Lohkaretyyppien 1–5 magneettisen susceptibiliteetin ja tiheyden vaihteluvälit on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. a) Magneettisen susceptibiliteetin ja b) tiheyden vaihtelu lohkaretyypeissä 1–5. Palkit kuvaavat 50%:a kaikista arvoista, poikkiviiva palkkien sisällä mediaaniarvoa, x-merkki keskiarvoa ja janat sekä piste palkkien päällä ääriarvoja.

Painoon suhteutettujen gammasäteilyarvojen (cps/kg; kts. kpl 7) vaihteluväli lohkaretyypeissä 1–5 on  $38\text{--}91\,000 \text{ cps/kg}$  ja keskiarvo  $1740 \text{ cps/kg}$ . Painoon suhteutetut gammasäteilyarvot on esitetty Kuvassa 9. Korkeimmat arvot ovat tyypin 4 lohkareissa, joissa arvot vaihtelevat välillä  $8900\text{--}91\,000 \text{ cps/kg}$ . Myös tyypin 1 lohkareissa on yleisesti korkeampi radioaktiivisuus verrattuna lohkaretyyppeihin 2, 3 ja 5: kaikkien lohkareiden keskiarvon ylittävistä lohkareista 78% vastaa tyyppiä 1. Tyyppi 1 sulkee sisäänsä myös lohkareita, joissa radioaktiivisuutta voidaan pitää vähäisenä ( $<1000 \text{ cps/kg}$ ).



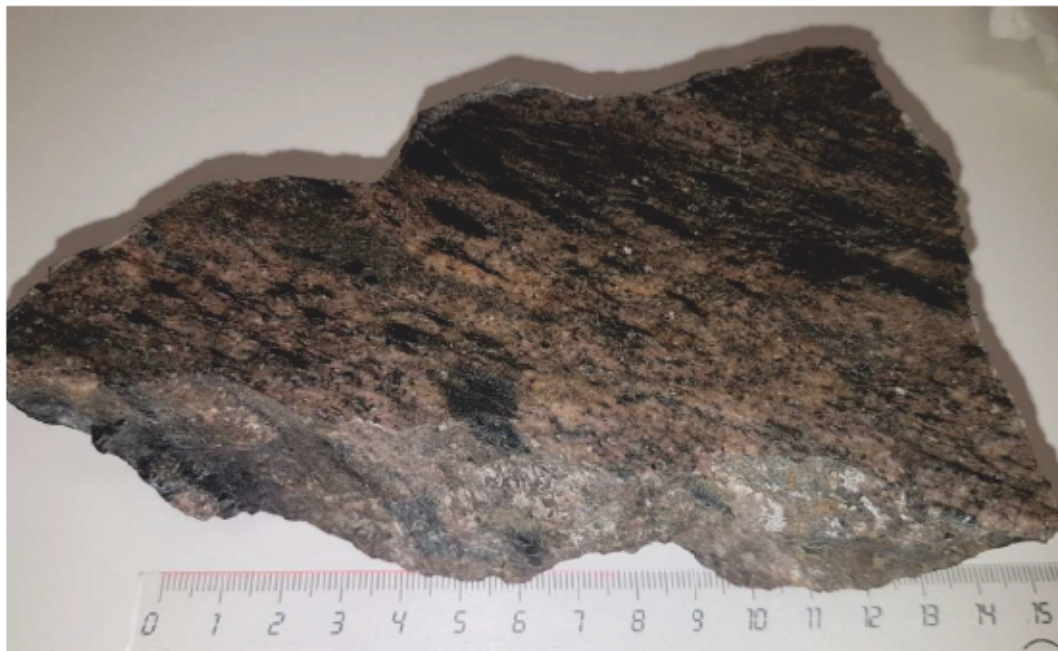


Kuva 9. a) Painoon suhteutetun radioaktiivisuuden vaihtelu lohkaretyypeille 1–5 ja b) lohkaretyypeille 1–3 ja 5. Palkit kuvaavat 50%:a kaikista arvoista, poikkiviiva palkkien sisällä mediaaniarvoa, x-merkki keskiarvoa ja janat palkkien laidoilla ääriarvoja.

## 8.4. Petrografia

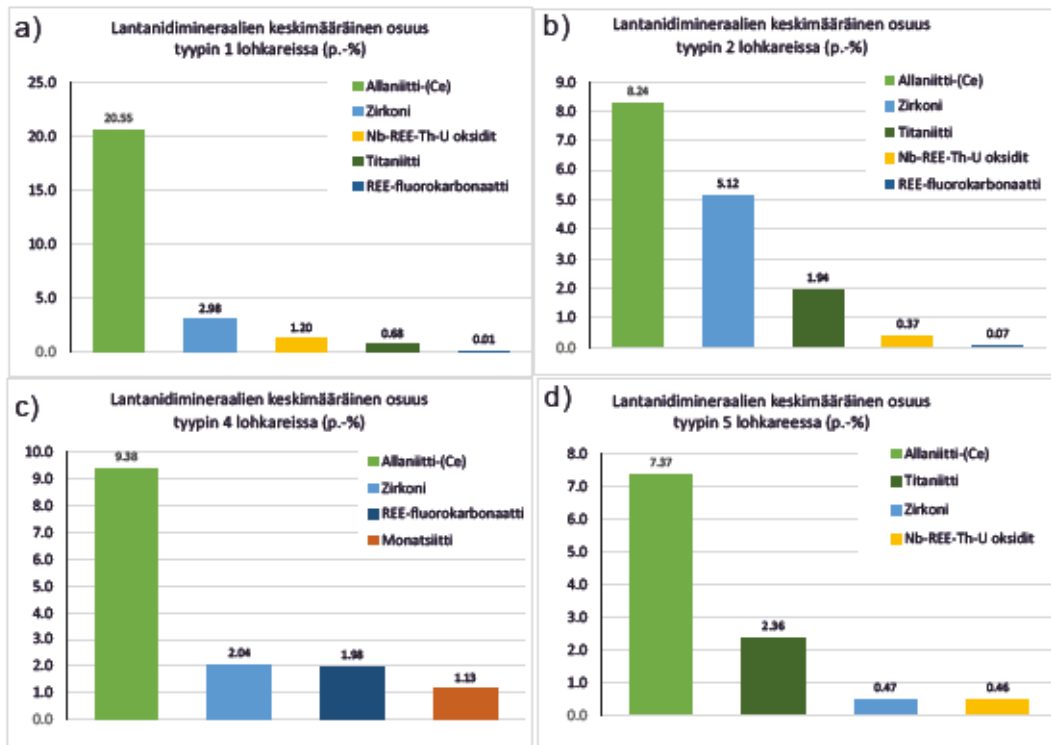
### 8.4.1. Yleisesti kaikista lohkaretyypeistä

Petrografinen tarkastelu osoittaa, että raekoko Otanmäen alueen Nb-Zr-REE-mineralisoituneissa lohkarkeissa on pääosin hienorakeinen (<1 mm), mutta erityisesti magnetiitti, fluoriitti ja joskus allaniitti esiintyvät myös karkeampirakeisina (>1 mm). Rakenne on yleensä gneissimäinen (Kuva 10) ja lohkarkeitä karakterisoi suuntautunut ja hiertynyt mikrorakenne.



Kuva 10. Otanmäen alueen lohkarkeille tyypillinen gneissimäinen tekstuuri näytteessä JII-18-L159, joka vastaa tyyppiä 2 (valokuva, sahattu ja kasteltu pinta). Vaaleat raidat koostuvat pääosin kvartsista ja kalimaasälvästä ja tummat raidat allaniitista ja magnetiitista. Mittakaava senttimetreissä.

Allaniittia on tavattiin kaikissa lohkaretyypeissä ja allaniittipitoisuuden vaihteluväli näytteissä on 0.28–52 p.-% ja keskiarvo n. 15 p.-%. Kuvassa 11 on esitetty lohkaretyyppien 1–2 ja 4–5 REE-mineraalien painoprosenttiosuuksia lohkaretyypeittäin ja kuvasta voidaan nähdä, että allaniittia esiintyy eniten lohkaretyypissä 1, keskimäärin noin 18 p.-%. Kuvasta 11 voidaan myös nähdä, että zirkonia esiintyy kaikissa lohkaretyypeissä ja titaniittia sekä Nb-REE-U-Th-oksidgeja esiintyy kaikissa muissa paitsi tyypin 4 lohkaretyypeissä. REE-fluorokarbonaattia on eniten tyypin 2 ja 4 lohkaretyypeissä ja monatsiittia ainoastaan yhdessä tyypin 4 lohkaretyypeessä. Tyypin 3 lohkaretyypeille ei tehty mineralogisia koostumusmittauksia tässä tutkimuksessa.

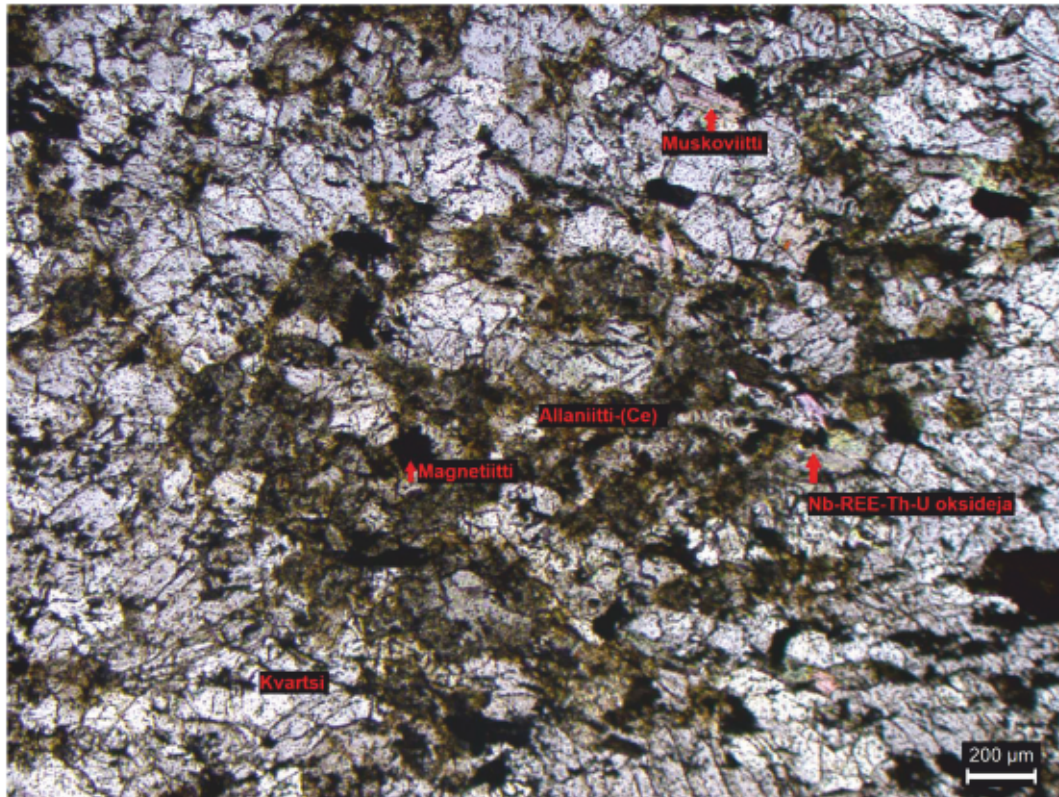


Kuva 11. REE-mineraalien keskimääräisiä painoprosenttiosuuksia lohkaretyypeissä (a) 1, (b) 2, (c) 4 ja (d) 5.

Allaniitti-(Ce), REE-fluorokarbonaatti, zirkoni ja Nb-REE-U-Th-oksidirakeissa on havaittavissa usein rakeen sisäistä koostumusvaihtelua. Koostumusvaihtelut ilmenevät erivärisinä alueina rakeen sisällä sekä valomikroskooppikuvissa että takaisinsironta elektronimikroskooppikuvissa. Takaisinsironta elektronimikroskooppikuvissa REE-mineraalit, kuten allaniitti, ovat usein rakeen keskellä



vaaleampia ja rakeen reunoilla tummempia, mikä viittaa korkeampiin lantanidi-pitoisuuksiin rakeen keskellä. Lisäksi allaniittirakeilla on usein epäselvät raerajat (Kuva 12).



Kuva 12. Ruskeaa allaniittia jolla on epäselvät raerajat. Allaniitti esiintyy vaalean kvartsi-plagioklaasi matriksin ympäröimänä opaakkien eli mustien magnetiitti- ja Nb-REE-Th-U-oksidirakeiden kanssa. Tasopolarisoitu valo (näyte JIJ-18-L124, tyyppi 1).

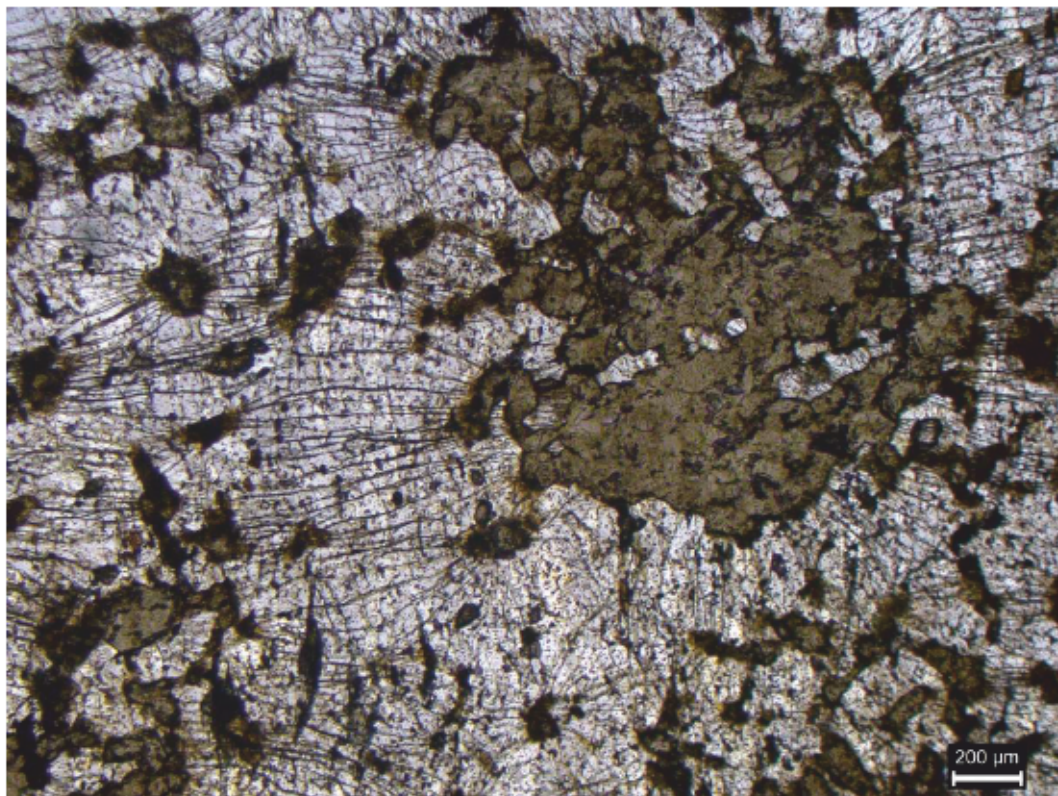
#### 8.4.2. Tyyppi 1

Tyyppin 1 lohkarissa kvartsi on yleisin harmemineraali ja allaniitti-(Ce) on yleisin REE-mineraali. Allaniittirakeet muodostavat foliaation kanssa samansuuntaisia raitoja (Kuva 13) tai rykelmiä, joiden leveys vaihtelee yleensä yhdestä millimetristä senttimetriin. Tyyppin 1 kvartsirakeiden mikrorakenteissa näkyy selkeitä merkkejä hiertymisestä. Kvartsirakeet ovat lähes kaikissa tyyppin 1 näytteissä suuntautuneita ja lisäksi kvartsirakeissa on yleensä havaittavissa koko näytteen läpi jatkuvia, suuntautuneita rakoja (Kuva 14). Nb-REE-U-Th-oksidiit esiintyvät usein allaniittiraitojen läheisyydessä tai pirotteena. Allaniitin lisäksi myös Nb-REE-U-Th-oksidiit esiintyy tyyppin 1 lohkarissa enemmän kuin muissa tyypeissä (Kuva 11).





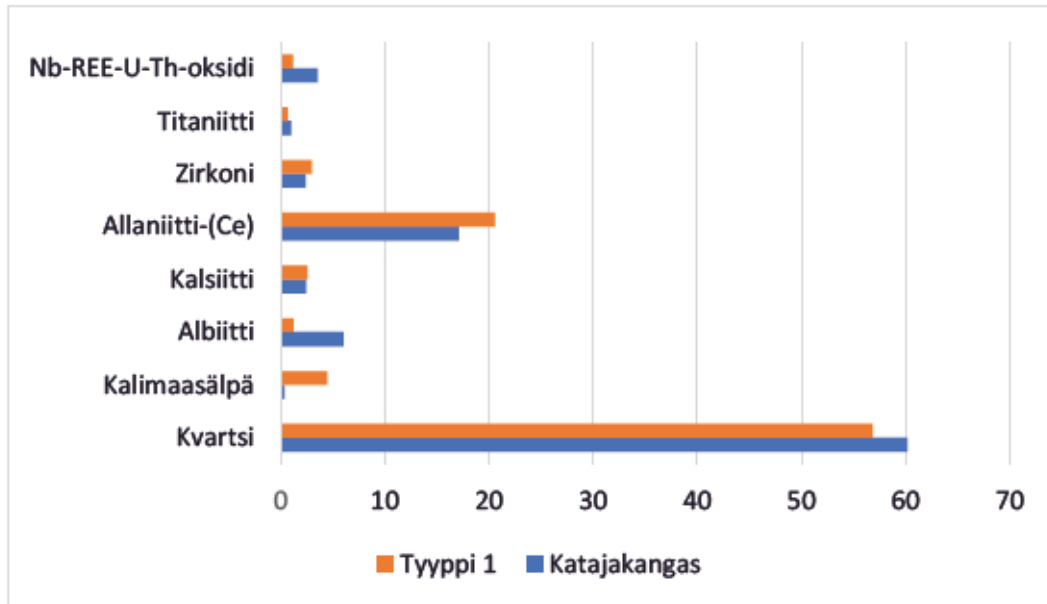
Kuva 13. Vaaleanharmaassa, kvartsirikkaassa kivessä esiintyviä tummia allaniittiraitoja sekä punertavia graniittisia suonia. Valokuva (näyte JIJ-18-L29, kuiva sahattu pinta). Mittakaava millimetreissä.



Kuva 14. Valomikroskooppikuva näytteestä, jossa ruskea mineraali on allaniittia ja vaalea mineraali kvartsia. Kvartsin läpi kulkee samansuuntaisia mikrorakoja. Tasopolarisoitu valo (näyte JIJ-18-L29, tyyppi 1).



Kuvassa 15 on vertailtu tyypin 1 lohkareiden keskimääräistä mineralogista koostumusta Katajakankaan mineralisaatioon ja kuva osoittaa, että koostumukset ovat pääosin hyvin lähellä toisiaan. Merkittävin ero on kalimaasälvän ja albiitin määrässä: tyypin 1 lohkareissa on keskimäärin enemmän kalimaasälvää ja vähemmän albiittia kuin Katajakankaan vyöhykkeen mineralisoituneissa kivissä.

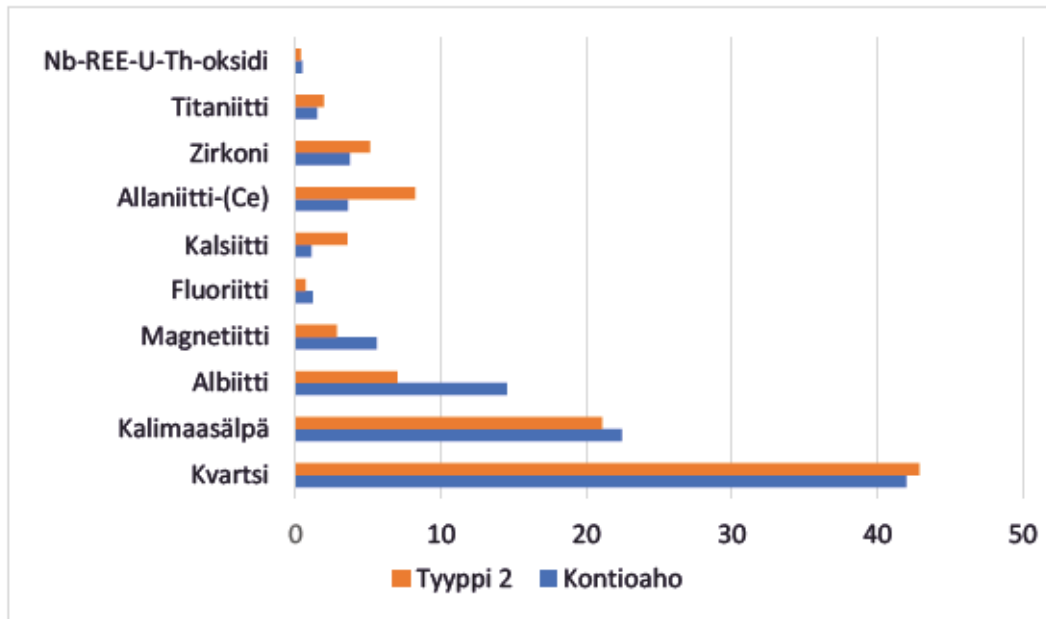


Kuva 15. Tyypin 1 lohkareiden keskimääräisiä mineraalien painoprosenttiosuuksia. Vertailuaineistona on esitetty Katajakankaan vyöhykkeen mineralisoituneiden juonten tyypillinen mineraalikoostumus (Kärenlampi et al. 2020).

#### 8.4.3. Tyypin 2

Tyypin 2 lohkareet ovat kvartsimaasälpärikkaita gneissejä. Lohkareiden kvartsipitoisuus vaihtelee välillä 10–55 p.-% ja muita runsaslukuisia mineraaleja (yli 5 p.-%) ovat vaihtelevasti kalimaasälpä, albiitti, allaniitti, kalsiitti, magnetiitti, zirkoni ja biotiitti. Myös näissä lohkareissa allaniitti-(Ce) on merkittävin lantanidien kantajamineraali ja se esiintyy usein rykelminä tai raitoina päämineraalien välissä. Myös Nb-REE-U-Th-oksidit ovat pääosin keskittyneet näiden raitojen tai rykelmien läheisyyteen. REE-fluorokarbonaattia tavattiin tyypin 2 lohkareissa useammin kuin tyypin 1 lohkareissa (Kuva 11), kuitenkin vain vähäisissä määrin (<1 p.-%). Kuva 10 vastaa tyyppiä 2. Kuvassa 16 on esitetty tyypin 2 lohkareiden keskimääräinen mineraloginen koostumus verrattuna Kontioahon mineralisaatioon ja kuvasta voidaan nähdä, että koostumukset vastaavat pääosin hyvin toisiaan. Merkittävimmät erot ovat albiitin ja allaniitin

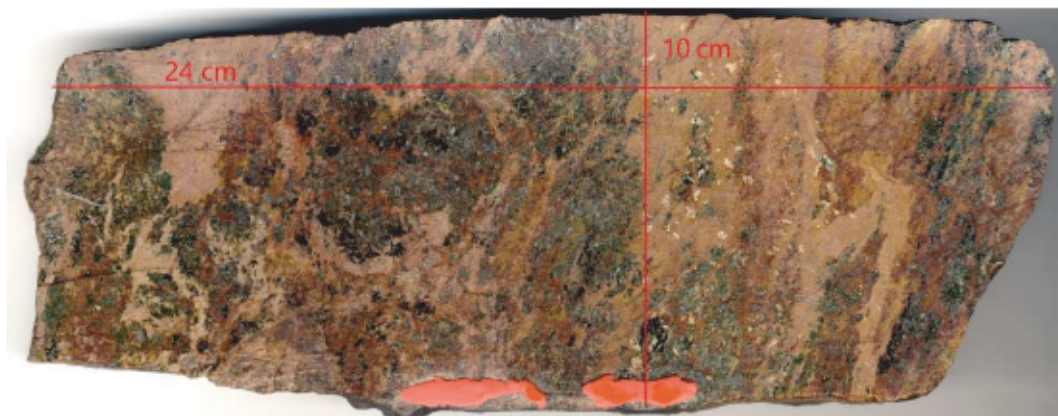
määrässä: tyypin 2 lohkeissa on keskimäärin vähemmän albiittia ja enemmän allaniittia kuin Kontioahon mineralisaatiassa.



Kuva 16. Tyypin 2 lohkeiden keskimääräisiä mineraalien painoprosenttiosuuksia. Vertailuaineistona on esitetty Kontioahon vyöhykkeen mineralisoituneen kivien tyyppillinen mineraalikoostumus (Kärenlampi et al. 2020).

#### 8.4.4. Tyypin 3

Tyypin 3 lohkeet koostuvat peralkalisesta egriinigraniitista, jota leikkaavat Nb-Zr-REE-mineralisoituneet, punertavan ruskeat kvartsijuonet (Kuva 17). Kvartsin lisäksi juonissa esiintyy runsaasti zirkonia, pyroklooria ja pieniä määriä bastnäsiittia ja monatsiittia (K. Kärenlampi, kirjallinen tiedonanto).



Kuva 17. Näyte tyypin 3 lohkeesta. Valokuva, sahattu, kasteltu pinta (näyte JPTA-2016-L2) (kuva: Kimmo Kärenlampi)

#### 8.4.5. Tyypin 4

Tyypin 4 lohkareet ovat toriittirikkaita gneissejä, joissa päämineraalien koostumusvaihtelu on suurta. Kahden tyypin 4 lohkareen koostumusmittauksien perusteella toriittia oli noin 4 p.-% ja 12 p.-%. Yleisimpiä päämineraaleja toriitin lisäksi ovat kvartsi, kalimaasälpä, albiitti ja magnetiitti. Lantanidien kantajamineraaleja ovat monatsiitti, REE-fluorokarbonaatti ja allaniitti-(Ce). Lohkareiden tekstuuri on useimmiten raitainen, jossa vuorottelevat tummat mineraalit, kuten allaniitti ja magnetiitti, sekä vaaleat mineraalit, kuten kalimaasälpä ja kvartsi (Kuva 18). Toriitti esiintyy usein magnetiitin läheisyydessä. Lohkareissa esiintyy myös kauttaaltaan tummien raitojen suuntaisia mikrorakoja ja niitä kulkee enemmän ja voimakkaammin tummien raitojen suuntaisesti.



Kuva 18. Tyypin 4 lohkare, näyte JIJ-18-L143. Valokuva, kuiva sahattu pinta. Voimakkaan punaruskea kivi koostuu pääosin kalimaasälvästä, kvartsista ja tummemmat raidat magnetiitista ja toriitista. Mittakaava millimetreissä.

#### 8.4.6. Tyypin 5

Tyypin 5 lohkareet eroavat merkittävästi muista lohkareista niiden mineraalikoostumuksen ja raekoon perusteella. Tyypin 5 lohkareet ovat fluoriitti-amfibolirikkaita gneissejä, joissa vuorottelevat tummanharmaat ja violetit raidat (Kuva 19). Amfibolin todettiin EDS analyysien perusteella olevan koostumukseltaan ferropargasiittia. Ferropargasiitin ja fluoriitin lisäksi lohkareissa



on tavattu myös mm. kvartsia, allaniittia, kalsiittia, albiittia, kalimaasälpää ja biotiittia. Raekoko on myös pääosin suurempi kuin muissa lohkaretyypeissä, esimerkiksi fluoriitin raekoko vaihtelee välillä 1–5 mm, kun muissa lohkaretyypeissä raekoko on yleensä alle 1 mm.



Kuva 19. Tyyppin 5 fluoriitti- ja amfibolirikas lohkar. Valokuva, kuiva sahattu pinta. Tummanvioletti mineraali on fluoriittia ja harmaanvihertävä mineraali amfibolia (ferropargasiitti). Mittakaava millimetreissä.

## 8.5. Mineraalikemia

### 8.5.1. Allaniitti

Allaniittia analysoitiin yhteensä 36 pistettä 12 näytteestä (Liite 10), jotka edustivat lohkaretyyppejä 1 ja 2. Allaniittirakeiden keskimääräisiä alkuainepitoisuuksia neljästä näytteestä on esitetty Taulukossa 2.  $\text{SiO}_2$ -pitoisuus eri analyysipisteissä on lähes vakio, mutta  $\text{FeO}$ -,  $\text{CaO}$ - ja  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -pitoisuuksissa on eri lohkarakkeiden välillä vaihtelua 0–10 p.-% verran. Taulukossa 2 alleviivatuista arvoista voidaan nähdä, että näytteissä JIJ-18-L182, JIJ-18-L218 ja JIJ-18-L207 suurempaa kalsiumin määrää vastaa pienempi lantanidien määrä ja päinvastoin, mikä viittaa lantanidien korvaavan kalsiumia allaniitin rakenteessa. Yleensä myös  $\text{FeO}$ - ja  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -pitoisuudet käyttäytyvät suhteessa lantanideihin samalla tavalla kuin  $\text{CaO}$ -pitoisuudet, ei kuitenkaan yhtä selkeästi. Nämä ilmiöt toistuvat myös muissa mitatuissa näytteissä. Tutkituissa näytteissä allaniitti on hyvin LREO-rikasta (Taulukko 2). Lisäksi näytteessä L144-18-JIJ havaittiin allaniittia, joka on elektronimikroskooppikuvassa ympäristöään selvästi vaaleampi rakeen keskeltä



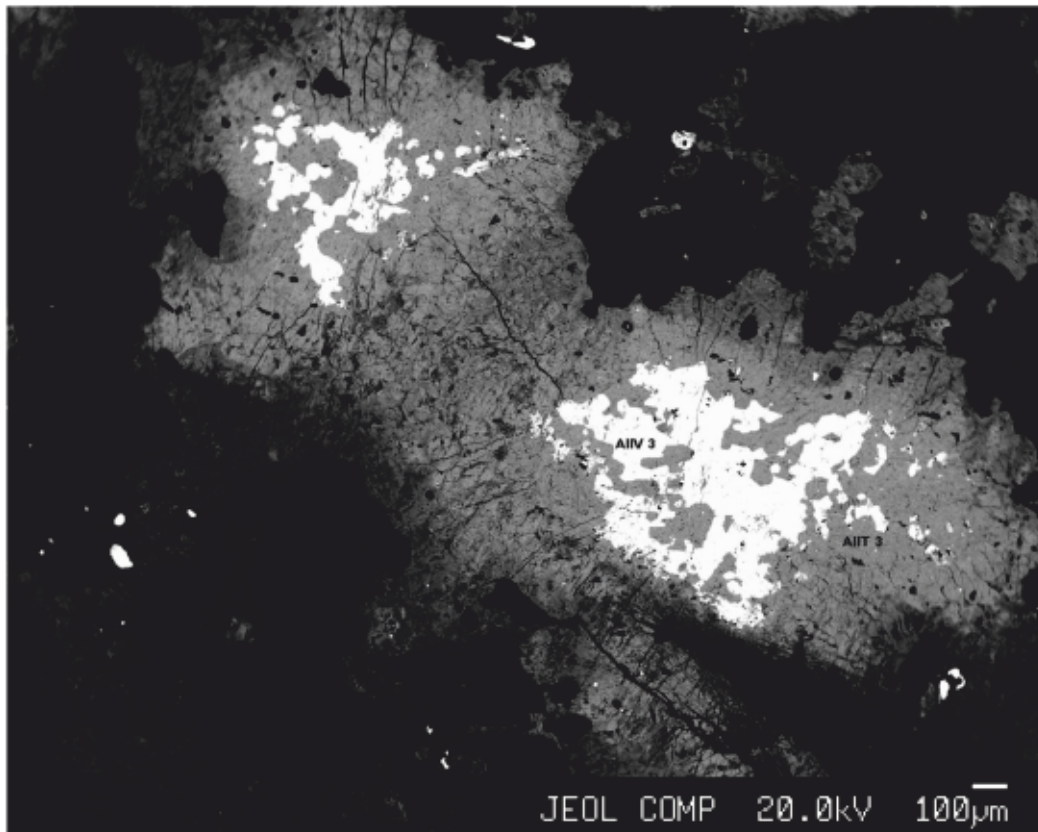
(Kuva 20) ja tämä vaalea osa on erittäin LREO-rikas (Taulukko 2). Vaalean osan koostumus muistuttaa silikaattimineraalia fluorobrihtoliitti-(Ce).

Taulukko 2. Allaniitin keskimääräisiä koostumuksia (p.-%) tyyppien 1 ja 2 lohkeissa.

Näytetunnus ja lohkaretyyppi/ Alkuaine (p.-%)	JIJ-18- L182 Tyyppi 1	JIJ-18- L218 Tyyppi 1	JIJ-18- L207 Tyyppi 2	JIJ-18-L144 Tumma Tyyppi 1	JIJ-18-L144 Vaalea Tyyppi 1
SiO <sub>2</sub>	34.5	34.2	35.3	31.7	22.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.8	18.3	20.5	11.6	-
CaO	<u>10.2</u>	<u>13.4</u>	<u>16.4</u>	9.7	13.6
FeO <sub>tot</sub>	9.8	12.7	12.6	18.3	-
LREO <sub>tot</sub> * (La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	<u>24.2</u>	<u>18.1</u>	<u>11.7</u>	27.4	45.0
HREO <sub>tot</sub> ** (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.2	0.7	1.1	0.3	15.4
REO <sub>tot</sub>	24.4	18.9	12.8	27.7	60.3
F	0.2	-	-	0.2	2.3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	1.5
Summa	96.6	97.4	97.6	99.2	100.4

\* LREO = kevyet lantanidioksidit (engl., light rare earth oxides)

\*\* HREO = raskaat lantanidioksidit (engl., heavy rare earth oxides)



Kuva 20. Allaniitti-(Ce) rae 1 tyypin lohkarissa (näyte L144-JIJ-18). Allaniitti-(Ce) rae on keskiosastaan erittäin LREO-rikas (n. 45 p.-%) ja vastaa koostumukseltaan Ce-rikasta fluorobrihtoliittia. Takaisinsironta elektronimikroskooppikuva.

#### 8.5.2. Zirkoni

Zirkonirakeita analysoitiin yhteensä 20 kpl 12 näytteestä, jotka edustivat tyyppejä 1 ja 2 (Liite 10). Analyysituloksien perusteella koostumusvaihtelu on vähäistä eri zirkonirakeiden ja näytteiden välillä ja rakeet koostuvat lähes kokonaan  $\text{ZrO}_2$  ja  $\text{SiO}_2$  (Taulukko 3). REO- ja  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  -pitoisuudet ovat zirkonirakeissa alle 1 p.-% ja muita alkuaineita, kuten  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$  ja  $\text{UO}_2$ , on zirkonirakeissa yleensä yhteensä alle 0.5 p.-%. REO,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$  ja  $\text{UO}_2$  -pitoisuudet ovat vastakkaisia  $\text{ZrO}_2$  -pitoisuuksien kanssa (Taulukko 3), mikä viittaa siihen, että zirkoniumia ovat korvanneet REE, Hf, Nb, U ja Th.

Taulukko 3. Zirkonin keskimääräisiä koostumuksia (p.-%) tyyppien 1 ja 2 lohkarissa.

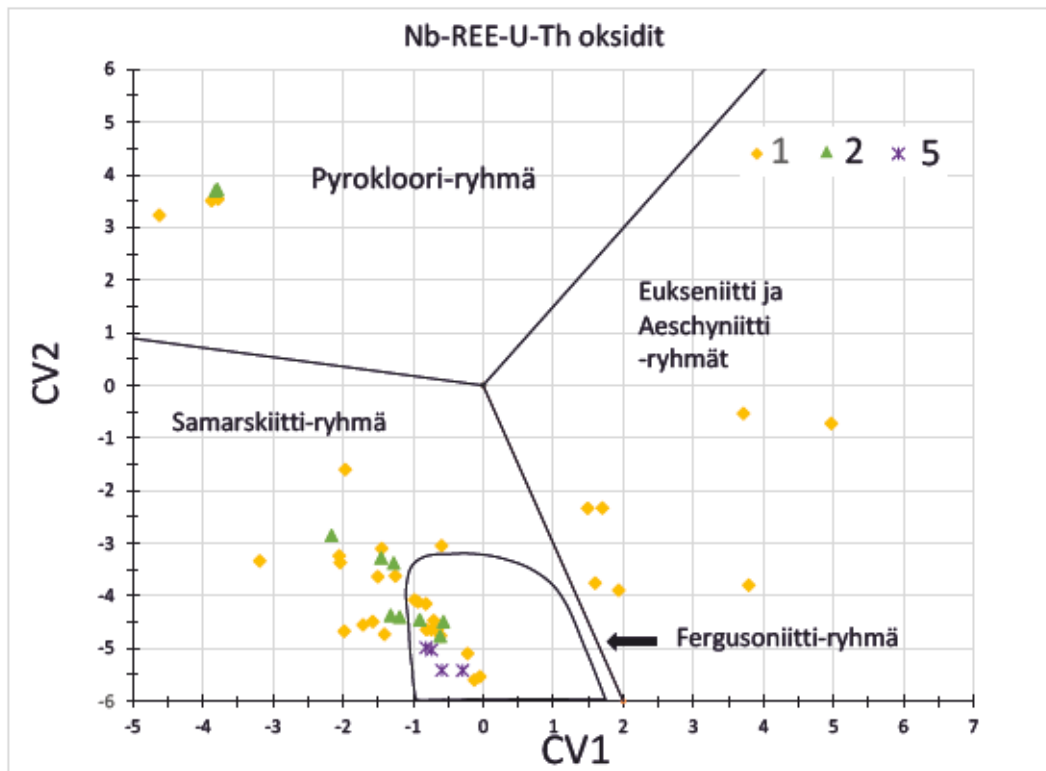
Näytetunnus ja lohkaretyyppi/ Alkuaine	JIJ-18-L113 Tyyppi 1	JIJ-18-L159 Tyyppi 2
ZrO <sub>2</sub> (p.-%)	65.35	63.45
SiO <sub>2</sub>	35.94	34.06
LREO <sub>tot</sub> * (La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.09	0.63
HREO <sub>tot</sub> ** (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.06	0.37
REO <sub>tot</sub>	0.15	1.00
HfO <sub>2</sub>	1.49	1.06
UO <sub>2</sub>	0.04	0.08
ThO <sub>2</sub>	0.00	0.11
REO <sub>tot</sub> + HfO <sub>2</sub> + UO <sub>2</sub> + ThO <sub>2</sub>	1.83	3.25
Summa	102.97	99.75

\* LREO = kevyet lantanidioksidit (eng. light rare earth oxides)

\*\* HREO = raskaat lantanidioksidit (engl. heavy rare earth oxides)

### 8.5.3. Nb-REE-U-Th-oksidit

Nb-REE-U-Th-oksidirakeita analysoitiin 58 kpl yhteensä 13 näytteestä, jotka edustivat lohkaretyyppejä 1, 2 ja 5 (Liite 10). Nb-REE-U-Th-oksidien analyysitulokset luokiteltiin käyttäen Ercitin (2005) kolmen ryhmän sääntöä (Kuva 21). Luokittelu osoittaa, että yleisimpiä Nb-REE-U-Th-oksideja lohkarissa ovat fergusoniiitti- ja samarskiitti-ryhmän mineraalit. Tyypissä 5 esiintyy vain fergusoniiittia tuloksien perusteella. Myös pyrokloori-, eukseniitti ja aeschyniitti-ryhmän mineraaleja esiintyy osassa näytteistä. Lisäksi tyypin 1 ja 2 lohkarissa tavattiin myös pieniä määriä ferrokolumbiittia.



Kuva 21. Nb-REE-Th-U-oksidi-mineraalit CV2 vs. CV1 Ercitin (2005) diagrammissa. Muuttujat CV1 and CV2 on laskettu käyttäen Ercitin (2005) kolmen ryhmän sääntöä:  $CV1 = 0.245 Na + 0.106 Ca - 0.077 Fe^*(Fe^* = Fe + Mn) + 0.425 Pb + 0.220 Y + 0.280 LREE + 0.137 HREE + 0.100 U^*(U^* = Th + U) + 0.304 Ti + 0.097 Nb + 0.109 Ta^*(Ta^* = Ta + W) - 12.81$  (oksidip.p.),  $CV2 = 0.102 Na - 0.113 Ca - 0.371 Fe^* - 0.167 Pb - 0.395 Y - 0.280 LREE - 0.265 HREE - 0.182 U^* - 0.085 Ti - 0.166 Nb - 0.146 Ta^* + 17.29$  (oksidip.p.). Huomioi että vain mitatut REE:t (La, Ce, Pr, Nd, Gd, Dy, Er, Sm, Eu ja Yb) on sisällytetty totaali REE summaan.

Kaikkien Nb-REE-Th-U-oksidioiden keskimääräiset Nb- ja REE-pitoisuudet on esitetty Taulukossa 4. Fergusoniitti-ryhmän tulokset osoittavat, että pääosa rakeista esiintyy muodossa fergusoniitti-(Y). Samarskiitti-, pyrokloori-, eukseniitti ja aeschyniitti-ryhmien rakeet eivät asetu selkeästi mihinkään niiden alaryhmistä, mikä johtuu todennäköisesti kemiallisesta muuttumisesta tai metamiktiytymisestä, mikä on näille mineraaleille tyypillistä (Ercit 2005). Yhteenlaskettu oksidisumma ( $Na_2O, ZrO_2, F, La_2O_3, Gd_2O_3, MgO, Nb_2O_5, Ce_2O_3, Dy_2O_3, Al_2O_3, K_2O, Pr_2O_3, Er_2O_3, SiO_2, CaO, Nd_2O_3, Y_2O_3, P_2O_5, MnO, Sm_2O_3, ThO_2, FeO, Eu_2O_3, UO_2, HfO_2, Yb_2O_3, TiO_2, Cl$  p.p.) jäi matalaksi suurimmassa osassa Nb-REE-Th-U-oksidirakeiden mittaustuloksissa, ollen keskimäärin noin 91 p.p., mikä voi selittyä osaksi mineraalien metamiktiytymisellä.



Taulukko 4. Nb-REE-Th-U-oksidi-mineraalien keskimääräisiä koostumuksia tyyppien 1, 2 ja 5 lohkarieissa.

Alkuaine (p.-%)	Pyrokloori	Fergusoniiitti- (Y)	Samarskiitti	Eukseniitti/ Aeschyniitti	Kolumbiitti- (Fe)
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	46.17	45.66	43.14	35.12	66.79
CaO	17.55	2.84	3.66	3.65	0.70
TiO <sub>2</sub>	5.78	0.18	0.43	14.32	0.49
FeO <sub>tot</sub>	4.15	1.28	3.32	3.47	14.97
SiO <sub>2</sub>	0.08	0.16	2.15	0.15	1.74
UO <sub>2</sub>	8.05	1.99	2.06	1.62	0.02
ThO <sub>2</sub>	0.03	0.89	1.35	4.10	0.10
F	1.36	0.82	0.38	0.15	0.00
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	26.24	21.28	11.95	1.25
HREO <sub>tot</sub> * (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.34	35.29	30.48	16.43	4.51
LREO <sub>tot</sub> ** (La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.16	0.85	1.63	13.92	1.03
REO <sub>tot</sub>	1.50	36.14	32.11	30.35	5.54
Summa	85.04	90.83	89.40	93.51	95.58

\*HREO = raskaat lantanidioksidit (engl., heavy rare earth oxides)

\*\*LREO = kevyet lantanidioksidit (engl., light rare earth oxides)

#### 8.5.4. REE-fluorokarbonaatti

REE-fluorokarbonaattia analysoitiin yhteensä 11 kpl kolmesta näytteestä, jotka edustivat lohkarieityyppejä 1, 2 ja 5. Mittauksien oksidisumma (Na<sub>2</sub>O, ZrO<sub>2</sub>, F, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ThO<sub>2</sub>, FeO, Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, UO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>, Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Cl p.-%) jäi kaikissa analyyseissä vajaan, keskimääräisen oksidisumman ollessa n. 71 p.-%. Hiiltä ei analysoitu, mikä osin selittää pääosin matalat oksidisummat. REE-fluorokarbonaattien keskimääräisiä koostumuksia on esitetty Taulukossa 5 lohkarieityypeittäin. Lantanidioksidipitoisuudet (REO<sub>tot</sub>) ovat mitatuissa mineraaleissa keskimäärin 61 p.-%, mistä suurin osa koostuu kevyistä lantanideista.

Taulukko 5. REE-fluorokarbonaatin keskimääräisiä koostumuksia painoprosentteina tyyppien 1, 2 ja 5 lohkareissa.

Näytetunnus ja lohkaretyyppi	JIJ-18-L227	JIJ-18-L169.2	JIJ-18-L213
Alkuaineet (p.-%)	Tyyppi 1	Tyyppi 2	Tyyppi 5
F	4.25	6.19	1.69
CaO	3.97	5.59	6.48
HREO <sub>tot</sub> * (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.37	2.01	1.12
LREO <sub>tot</sub> ** (La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	59.72	61.95	60.05
REO <sub>tot</sub>	61.09	62.58	61.18
Summa	69.31	74.35	69.34

\*HREO = raskaat lantanidioksidit (engl., heavy rare earth oxides)

\*\*LREO = kevyet lantanidioksidit (engl., light rare earth oxides)

## 8.6.Kokokivigeokemia

### 8.6.1. Pääalkuaineet

Taulukossa 6 on esitetty kemialliset esimerkkikoostumukset kaikista lohkaretyypeistä. Taulukosta voidaan nähdä, että olennaisimpia pääalkuaineita kaikissa lohkareissa ovat Si, Al, Ca, Fe, K, Nb, Zr, Th, Y ja lantanidit.

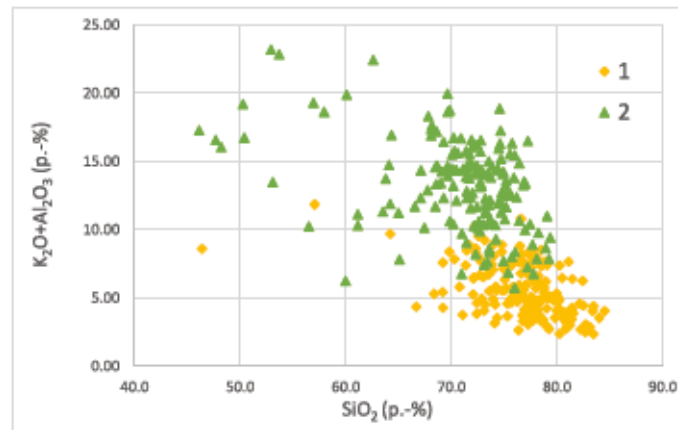
Taulukko 6. Tyypien 1–5 lohkareiden kemiallisia koostumuksia. Pääalkuaineet painoprosentteina ja hivenalkuaineet ppm:nä.

Näytetunnus	L227-JIJ	L207-JIJ	L1/1-JPTA	L143-JIJ	L213-JIJ
Tyyppi	1	2	3	4	5
Analyysimenetelmä	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	XMET8000	ICP-OES/-MS
SiO <sub>2</sub>	73.36	64.2	70.12	58.11	49.66
TiO <sub>2</sub>	0.39	0.68	1.01	0.29	0.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.41	8.58	4.8	9.55	4.39
FeO <sub>tot</sub>	5.52	7.67	7.09	7.76	9.04
MnO	0.10	0.17	0.19	0.12	0.20
MgO	0.93	0.43	0.25	3.97	2.00
CaO	3.6	3.61	1.39	3.09	25.07
Na <sub>2</sub> O	0.27	0.47	2.99		0.6
K <sub>2</sub> O	0.8	3.31	2.32	7.73	1.14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.02	0.21	0.83	0.26
F	0.09	0.18	0.85		12.86
CO <sub>2</sub>	0.29	1.32	0.27		0.37
HH *	2.90	3.50			2.90
Summa	94.65	93.97	91.30	91.34	109.34
Nb	3786	3895	10223	1220	1176
Ta	222	256	569	66	22
Zr	9071	26193	22472	6509	2056
Hf	167	630	507	122	38
Th	1446	898	456	9168	787
U	317	225	601	116	106
Y	2415	1951	2348	1083	2848
La	4200	2758	4147	1425	2924
Ce	9360	5834	8389	2203	5210
Pr	1088	666	920	292	526
Nd	3849	2378	3182	498	1728
Sm	754	451			262
Eu	68	42			32
Gd	636	401			278
Tb	97	65			59
Dy	528	381			467
Ho	95	77			113
Er	245	217			353
Tm	30	30			47
Yb	162	178			278
Lu	19	24			40

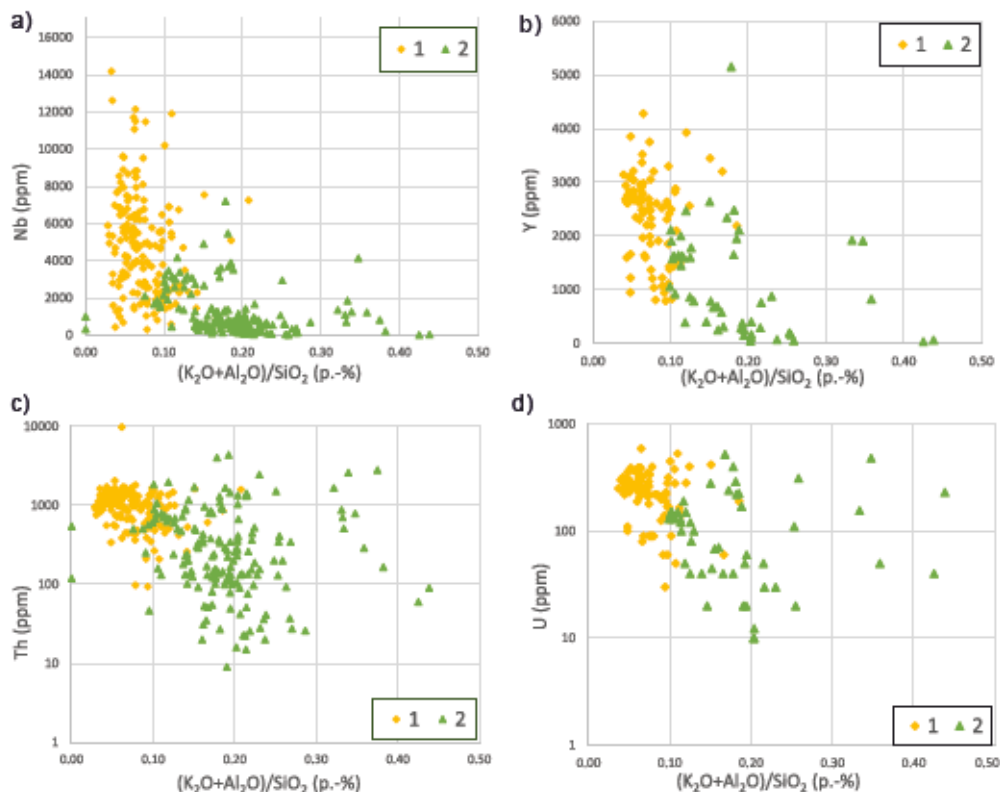
\*HH = hehkutushäviö



Kokokivianalyysien tulokset osoittavat, että  $K_2O$ - ja  $Al_2O_3$ -pitoisuudet seuraavat tyypin 1 ja 2 lohkarieissa toisiaan ja näillä pitoisuuksilla on vastakkainen trendi  $SiO_2$ -pitoisuuksien kanssa (Kuva 22). Tämä trendi on lohkarieyyppien 1 ja 2 merkittävin erottaja;  $K_2O$ - ja  $Al_2O_3$ -pitoisuudet ovat matalampia tyypin 1 kivissä kuin tyypin 2 kivissä. Pääsääntöisesti  $K_2O$ - ja  $Al_2O_3$ -pitoisuudet ovat tyypin 1 kivissä  $<10$  p.-% ja tyypin 2 kivissä  $>10$  p.-%. Verrattaessa 1 ja 2 tyypin lohkarieiden  $K_2O+Al_2O_3/SiO_2$ -arvoja Nb-, Y-, Th- ja U-pitoisuuksiin (Kuva 23) voidaan huomata, että tyypin 1 lohkarieissa on pääosin korkeammat Nb-, Y-, Th- ja U-pitoisuudet kuin tyypin 2 lohkarieissa.

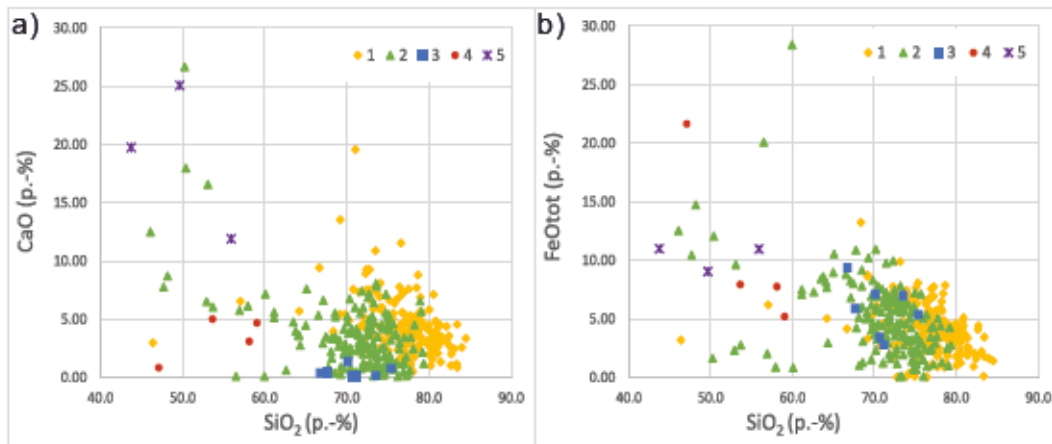


Kuva 22.  $K_2O + Al_2O_3$  vs.  $SiO_2$  diagrammi tyypien 1 ja 2 lohkarieille.



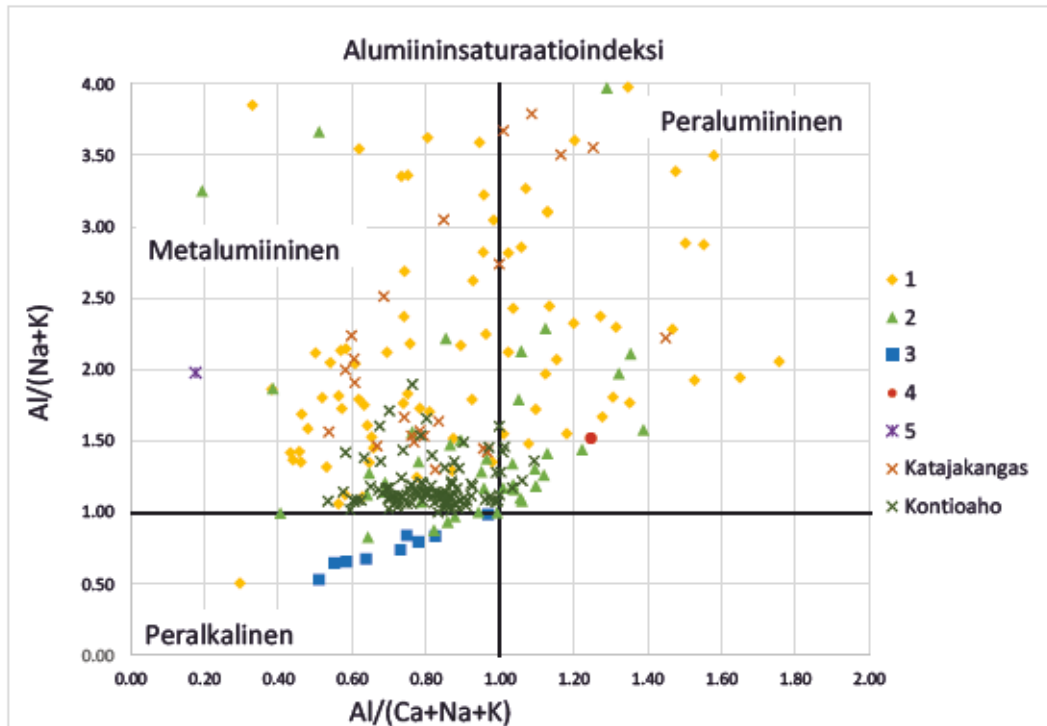
Kuva 23. (a) Nb-, (b) Y-, (c) Th- ja (d) U-pitoisuudet verrattuna  $K_2O+Al_2O_3/SiO_2$ -arvoihin tyypin 1 ja 2 lohkarieissa.

$\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ja  $\text{K}_2\text{O}$  lisäksi kaikissa lohkarieissa on vaihtelevasti huomattavia pitoisuuksia rautaa ja kalsiumia. Kuvissa 24 on esitetty tyypeittäin kaikkien lohkarieiden  $\text{CaO}$ - ja  $\text{FeO}_{\text{tot}}$ -pitoisuudet suhteessa  $\text{SiO}_2$ -pitoisuuksiin, mistä voidaan nähdä, että  $\text{CaO}$ -pitoisuudet ovat korkeampia lohkarieyyppissä 5 ja matalampia lohkarieyyypeissä 3 verrattaessa lohkarieyyypeihin 1, 2 ja 4 (Kuva 24a). Lisäksi lohkarieiden  $\text{FeO}_{\text{tot}}$ -pitoisuuksilla vaikuttaa olevan heikko vastakkainen trendi  $\text{SiO}_2$ -pitoisuuksien kanssa (Kuva 24b). Lisäksi kuvasta 24 voidaan nähdä, että  $\text{SiO}_2$ -pitoisuudet ovat pienempiä tyyppin 4 ja 5 lohkarieissa kuin tyypeissä 1–3.



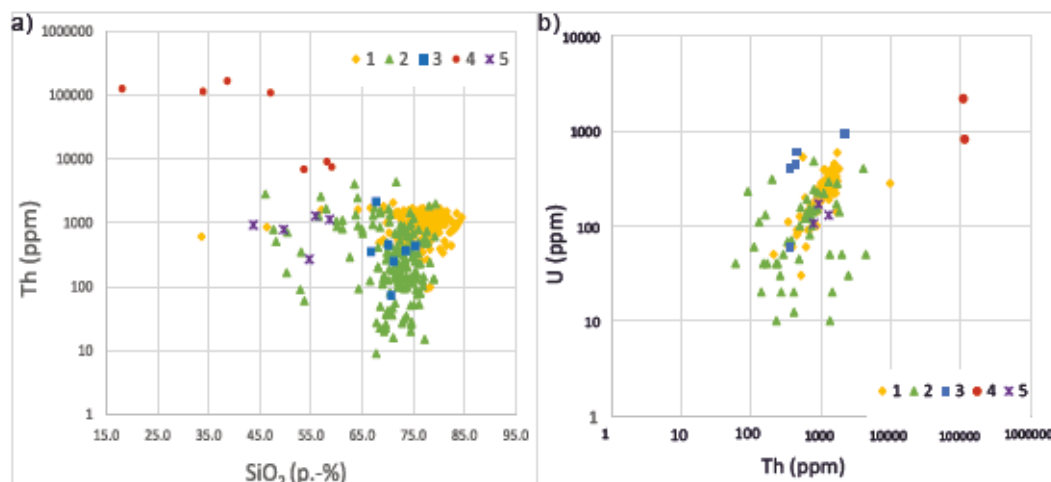
Kuva 24. a)  $\text{CaO}$  vs.  $\text{SiO}_2$  ja b)  $\text{FeO}_{\text{tot}}$  vs.  $\text{SiO}_2$  diagrammit lohkarieyyypeille 1–5.

Tyyppin 3 lohkarieet erottuvat selkeimmin muista lohkarieyyypeistä alkali- ja alumiinisaturaatioindeksien perusteella ( $A/NK$  ja  $A/CNK$ ; Kuva 25). Kuvasta 25 voidaan nähdä, että peralkalisia ovat pääasiassa vain tyyppin 3 lohkarieet. Valtaosa muista tyypeistä edustavista lohkarieäytteistä on joko metalumiinisia tai peralumiinisia, kuitenkin niin että metalumiinisia on hieman enemmän kuin peralumiinisia. Kuvassa 25 on myös esitetty Katajakankaan ja Kontioahon mineralisaatioiden alkali- ja alumiinisaturaatioindeksien vaihteluvälit, jotka pääosin ovat verrattavissa tyyppin 1 ja 2 lohkarieisiin.



Kuva 25. Molaarinen  $Al/(Na+K)$  vs.  $Al/(Ca+Na+K)$  diagrammi lohkaretyypeille 1–5. Vertailuaineistona on esitetty analyysejä Kontioahon ja Katajakankaan mineralisoituneista vyöhykkeistä Otanmäen alueelta (Kärenlampi et al. 2020).

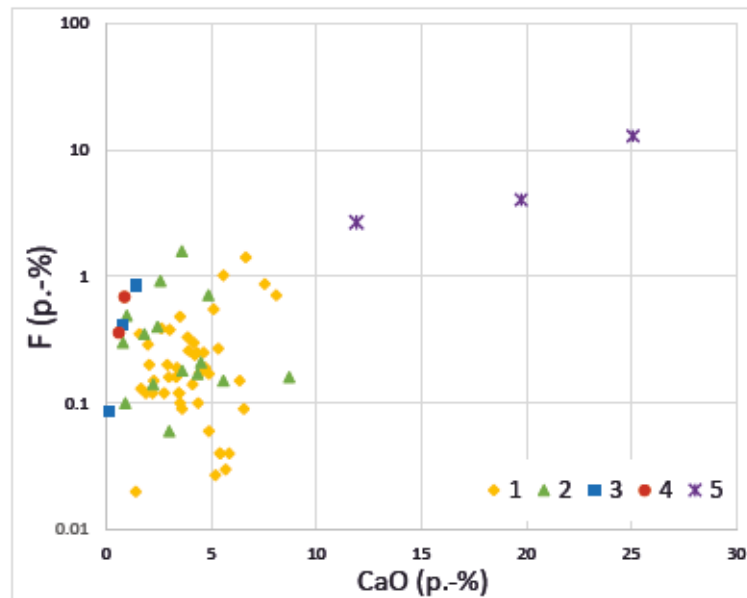
Tyyppin 4 lohkarieet erottuvat muista lohkarieista selkeimmin niiden korkeiden Th-pitoisuuksien perusteella. Kuvasta 26a voidaan havaita, että muissa lohkarieityypeissä Th-pitoisuudet jäävät pääosin alle 1 p.% kun taas tyyppin 4 lohkarieissa Th-pitoisuudet ovat lähes 10 p.% tai yli. Myös U-pitoisuudet ovat hieman korkeammat tyyppin 4 lohkarieissa kuin muissa lohkarieityypeissä, mutta ei yhtä merkittävästi kuin toriumin (Kuva 26b). Kuvasta 26b voidaan myös nähdä, että tyyppin 3 lohkarieissa on pääosin hieman korkeampi U-pitoisuus kuin lohkarieityypeissä 1, 2 ja 5.



Kuva 26. a) Th vs  $SiO_2$  ja b) Th vs U diagrammi lohkarieityypeille 1–5 edustaville näytteille.



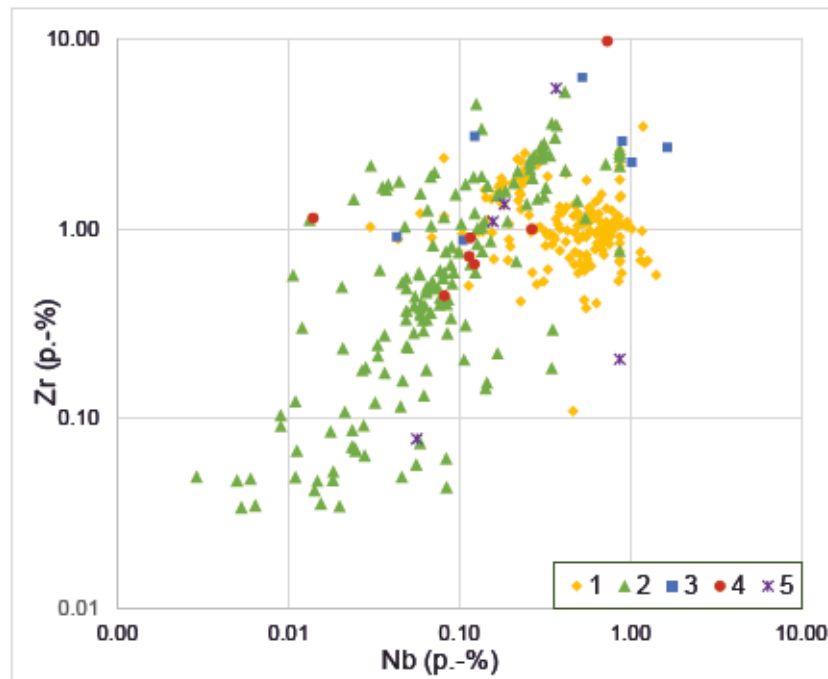
Tyypin 5 lohkat erottuvat selkeimmin muista lohkatyypeistä korkeiden F- ja Ca-pitoisuuksien perusteella. Kuvassa 27 voidaan nähdä, että muissa lohkatyypeissä F-pitoisuudet ovat pääosin alle 1 p.-% kun taas tyypin 5 lohkatyypeissä F-pitoisuus vaihtelee välillä 2.5–13 p.-%. Korkeat Ca- ja F-pitoisuudet selittyvät korkealla fluoriitin ( $\text{CaF}_2$ ) määrällä tyypin 5 lohkatyypeissä.



Kuva 27. CaO vs. F diagrammi lohkatyyppejä 1–5 edustaville näytteille.

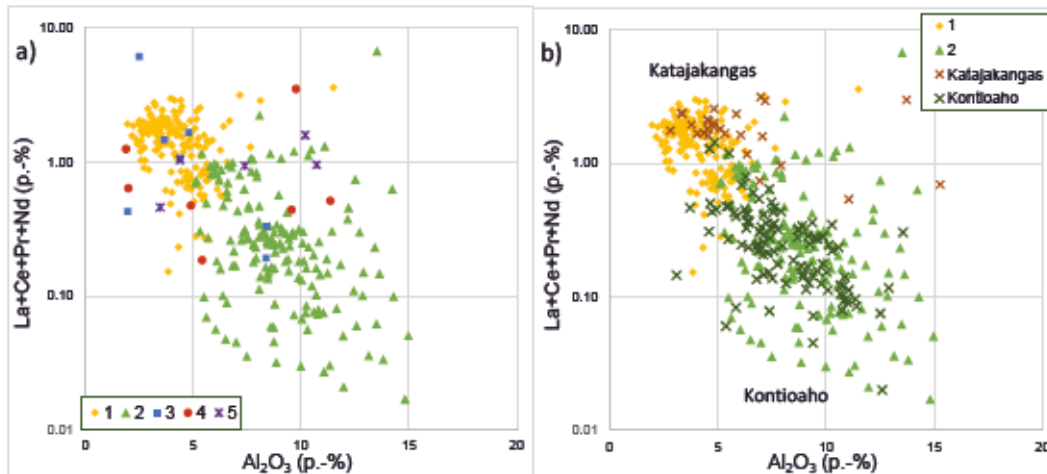
#### 8.6.2. Nb-, Zr- ja lantanidipitoisuudet

Lohkatyyppejä 1–5 edustavissa näytteissä Nb- ja Zr-pitoisuudet vaihtelevat välillä 0–1.4 p.-% ja 0.2–10 p.-% (Kuva 28). Tyypin 1 ja 4 lohkatyypeissä Zr-pitoisuus on pääsääntöisesti n. 1 p.-%, mutta tyypin 2, 3 ja 5 lohkatyypeissä on enemmän hajontaa. Nb-pitoisuudet ovat tyypin 2 ja 4 lohkatyypeissä pääosin matalia (<0.02 p.-%), mutta tyypin 1, 3 ja 5 lohkatyypeissä Nb-pitoisuudet vaihtelevat melko paljon. Korkeimmat Zr-pitoisuudet ovat pääsääntöisesti tyypin 2 ja 3 lohkatyypeissä ja korkeimmat Nb-pitoisuudet tyypin 1 lohkatyypeissä.



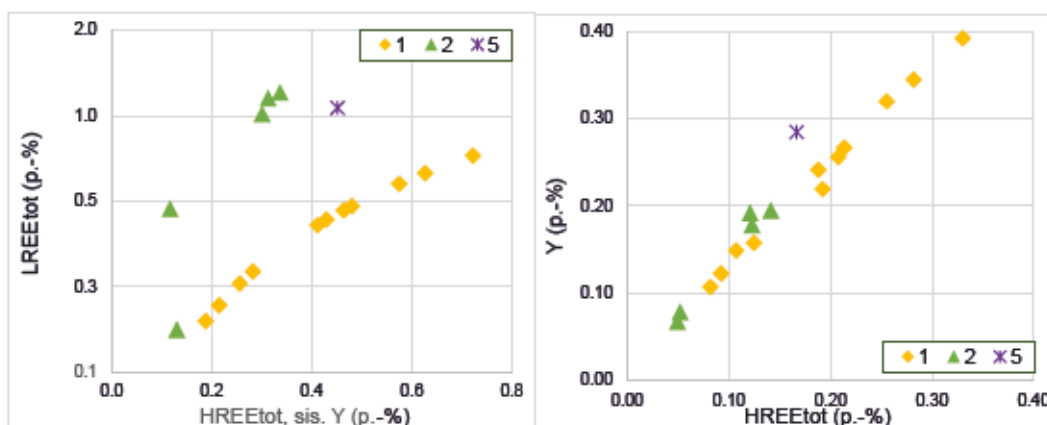
Kuva 28. Nb vs. Zr diagrammi lohkaretyyppejä 1–5 edustaville näytteille.

Lantanidipitoisuuksilla lohkaretyypien 1–5 näytteissä on negatiivinen trendi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -pitoisuuksien kanssa (Kuva 29). Lantanidipitoisuudet ovat korkeimmat tyypeissä 1 ja 3 ja matalimmat tyypin 2 lohkarissa. Tyypissä 1 ja 3 lantanidipitoisuudet ovat pääosin  $>1$  p.-% ja korkeimmillaan 6 p.-%, kun taas tyypin 2 lohkarissa lantanidipitoisuudet ovat pääosin  $<1$  p.-% (Kuva 29a). Kuvassa 29b on verrattu tyypin 1 ja 2 lohkariden sekä Katajakankaan ja Kontioahon mineralisoituneiden kivien lantanidipitoisuuksia  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -pitoisuuksiin. Tyypin 1 lohkariden voidaan havaita olevan verrattavissa Katajakankaan mineralisaation kanssa ja tyypin 2 lohkarista suurin osa vastaa Kontioahon mineralisaatiota.



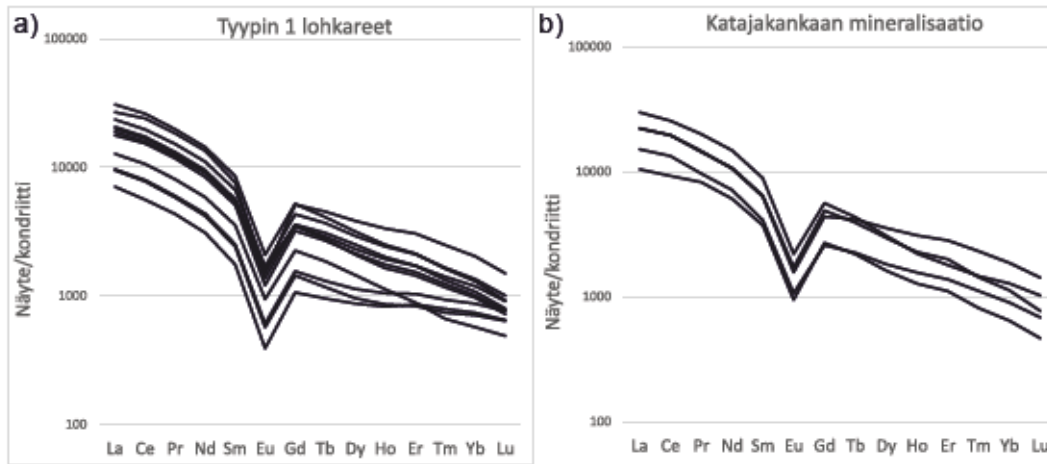
Kuva 29. La+Ce+Pr+Nd+Y vs.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  diagrammit a) lohkaretyyppejä 1–5 edustaville näytteille ja b) lohkaretyyppejä 1 ja 2 edustaville näytteille. Vertailuaineistona on esitetty analyysejä Kontioahon ja Katajakankaan mineralisoituneista vyöhykkeistä Otanmäen alueelta (Kärenlampi et al. 2020).

Kuvassa 30 voidaan nähdä, että pääosa lohkareissa esiintyvistä lantanideista on kevyitä lantanideja. LREE/HREE arvot vaihtelevat välillä 1.4–5.3 ja niiden keskiarvo on 4, mikä siis tarkoittaa että kevyitä lantanideja on lohkareissa keskimäärin neljä kertaa enemmän kuin raskaita lantanideja. Kevyiden lantanidien (La–Sm) yhteenlaskettu pitoisuus vaihtelee välillä 0.15–3.3 p.-% ja raskaiden harvinaisten maametallien (sis. Eu–Lu+Y) välillä 0.05–0.33 p.-%. Raskaista harvinaisista maametalleista yttriumin osuus on noin 50%:a (Kuva 30b).



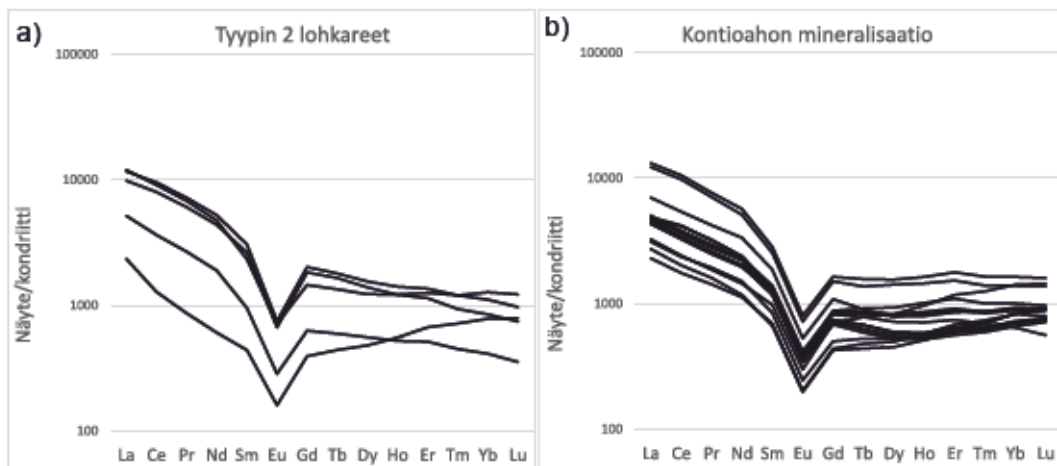
Kuva 30. a) LREE (La, Ce, Pr, Nd ja Sm) vs HREE (Y, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb ja Lu) ja b) Y vs. HREE (Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb ja Lu) diagrammit lohkaretyyppejä 1, 2 ja 5 edustaville näytteille.

Kondriitteihin normalisoidut REE-kuvaajat (Kuva 31) kertovat, että pääosa tyyppin 1 lohkareista on vastaavia Katajakankaan mineralisaation kanssa. Kuvasta 31 voidaan myös nähdä, että tyyppin 1 kivet ovat LREE-rikastuneita.



Kuva 31. a) Tyyppin 1 lohkareiden ja Katajakankaan mineralisaation kondriittinormalisoidut REE-kuvaajat. b) Vertailuaineistona on esitetty analyysijä Katajakankaan vyöhykkeen mineralisoituneista juonista (Kärenlampi et al. 2020). Normalisointiarvot McDonough ja Sun (1995).

Kuvasta 32 voidaan nähdä, että pääosa tyyppin 2 lohkareista vastaa hyvin Kontioahon mineralisaatiota kondriittinormalisoidun REE-kuvaajan perusteella. Myös tyyppin 2 kivet ovat LREE-rikastuneita. Lisäksi tyyppin 1 ja 2 lohkareilla on negatiivinen Eu-anomalia:  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$ -arvot vaihtelevat välillä 0.24–0.39.

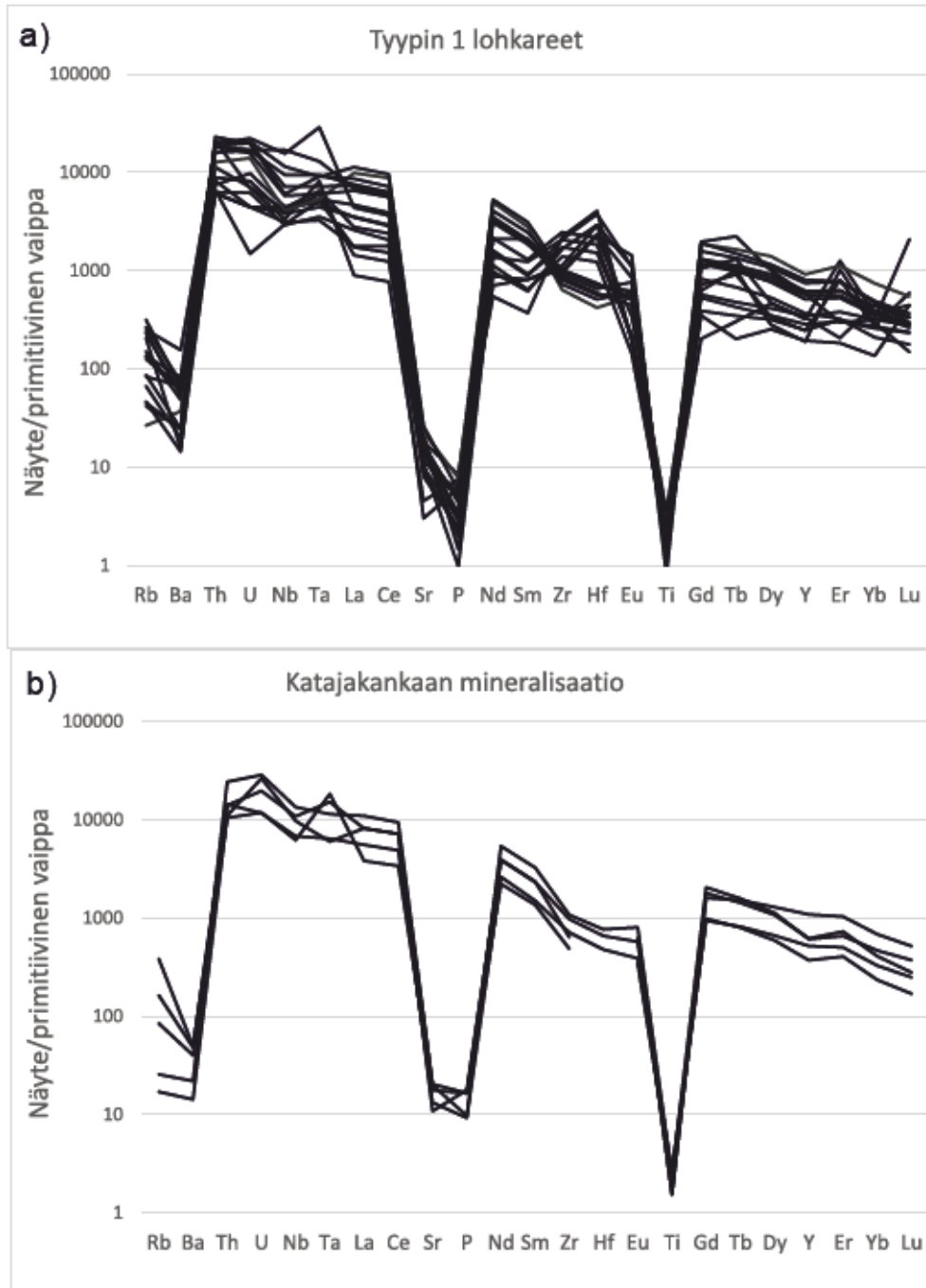


Kuva 32. a) Tyyppin 2 lohkareiden kondriittinormalisoidut REE-kuvaajat. b) Vertailuaineistona on esitetty analyysijä mineralisoituneista kivistä Kontioahon vyöhykkeestä (Kärenlampi et al. 2020). Normalisointiarvot McDonough ja Sun (1995).



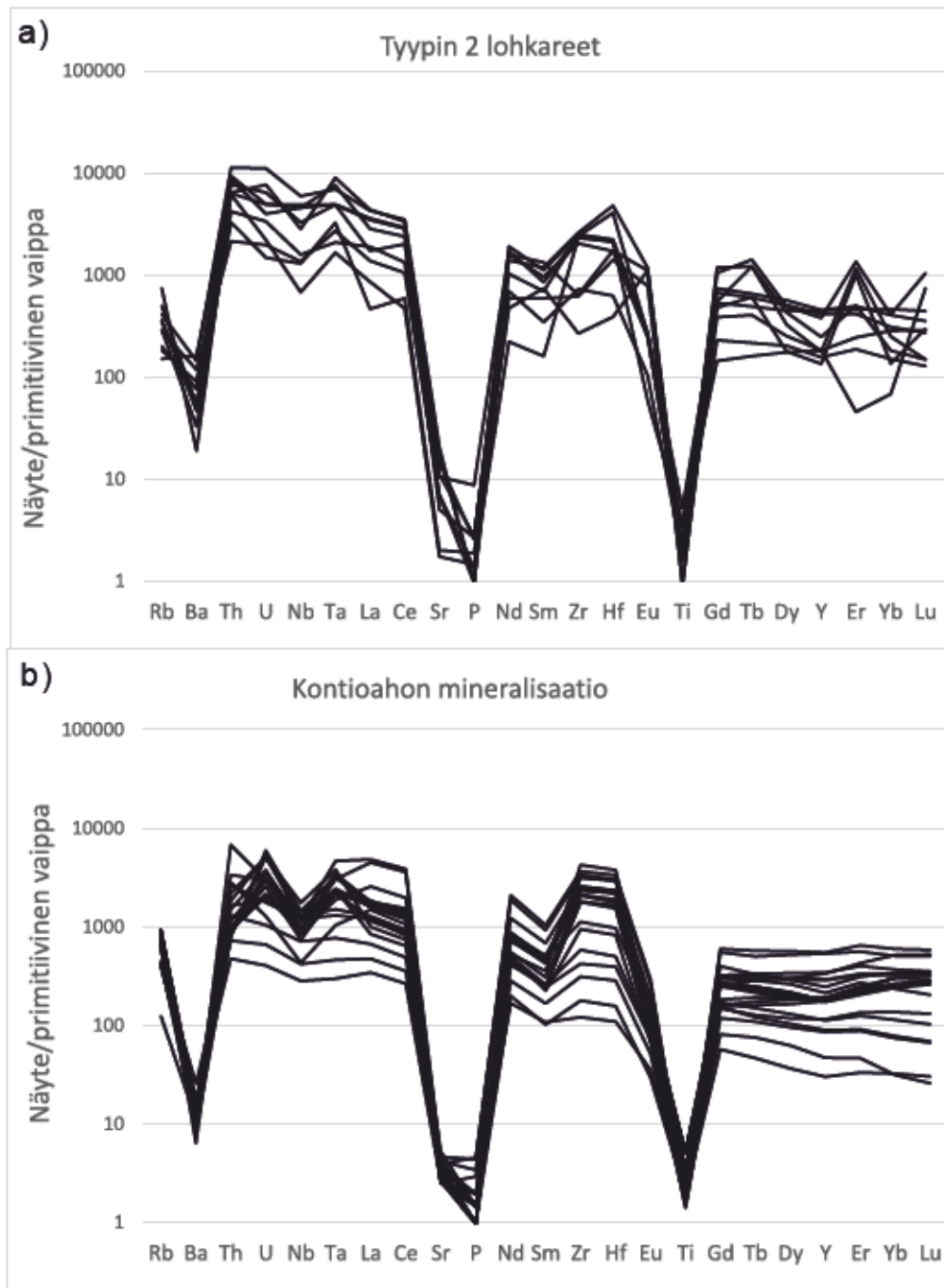
### 8.6.3. Muut hivenalkuaineet

Hivenalkuaineiden arvot osoittavat primitiiviseen vaippaan normalisoidussa spidergrammissa (Kuva 33), että tyypin 1 lohkarit vastaavat hyvin Katajakankaan mineralisaatiota hivenalkuainejakaumaltaan.



Kuva 33. a) Primitiiviseen vaippaan normalisoidut hivenainepitoisuudet tyypin 1 lohkarissa. b) Vertailuaineistona on esitetty analyysejä Katajakankaan vyöhykkeen mineralisoituneista juonista Otanmäen alueelta (Kärenlampi et al. 2020). Normalisointiarvot McDonough ja Sun (1995).

Myös tyypin 2 lohkarieet muistuttavat pääosin Kontioahon mineralisaation hivenalkuainejakaumaa (Kuva 34). Kuvassa 34 on nähtävillä myös, että tyypin 2 lohkarieiden spidergrammissa esiintyy hieman hajontaa alkuaineilla Nb, Zr, Hf ja HREE. Kuvien 33 ja 34 spidergrammeista voidaan myös yleisesti sanoa, että tyypin 1 ja 2 lohkarieissa on voimakkaasti rikastunut Th, U, Nb, Ta, Zr, Hf ja REE suhteessa Ti, Ba, Rb, P ja Sr.



Kuva 34. a) Primitiiviseen vaippaan normalisoidut hivenainepitoisuudet tyypin 2 lohkarieissa. Vertailuaineistona on esitetty analyysyjä Kontioahon vyöhykkeen mineralisoituneista kivistä (Kärenlampi et al. 2020). Normalisointiarvot McDonough ja Sun (1995).

## 9. POHDINTA

### 9.1.Lohkareiden fysikaaliset ominaisuuksien ja viuhkojen tulkintaa

Pääosa Otanmäen alueen Nb-Zr-REE-mineralisoituneista lohkareista vaikuttaisi kulkeutuneen niiden löytöpaikkaan melko läheltä. Esimerkiksi suurin osa lohkareista todettiin kulmikkaiksi, mikä viittaa siihen, että ne eivät ole kulkeneet jäätikön mukana kovin kaukaa ja ne ovat asettuneet lähelle niiden lähtöpaikkaa (vrt. Saltikoff 1985). Koska lohkarereet on löydetty läheltä maanpintaa, ne todennäköisesti edustavat viimeisintä jäätikön liikettä alueella (vrt. Hirvas 1980) ja näin ollen ovat peräisin lähialueen kallioperän pinnasta. Tätä tukee myös tieto siitä, että maaperän paksuus on arvioitu olevan Otanmäen alueella pääosin 1–10 m (GTK 2009) ja myös kallioperäpaljastumia on tavattu, mikä viittaa ohueen maaperän kerrospaksuuteen (vrt. Saltikoff 1985). Suuri osa löydettyistä lohkareista on kooltaan suhteellisen tasakokoisia ja pieniä, keskimääräinen koko on noin 0.5x0.3x0.3 m. Pieni lohkar koko viittaa siihen, että kallioperän rakoilu alueella on tiheää, koska jäätikkö ottaa liikkueessaan mukaansa pääasiassa vain jo valmiiksi rapautuneita/irralisia kiviä (vrt. Puranen 1988). Paikallista lohkarereiden lähtöaluetta tukee myös lohkarereityyppien 1 ja 2 mineralogia, joka vastaa pääosin hyvin niille oletettuja kallioperän lähteitä, eli mineralisoituneita kiviä Katajakankaan ja Kontioahon vyöhykkeissä. Lisäksi lohkarereiden edustamat kivilajit ovat kaikki voimakkaasti suuntautuneita, mikä on tyypillistä Otanmäen kallioperän kivilajeille (Kärenlampi et al. 2019; 2020). Suurimmat lohkarereet, joissa lohkarereen läpimitta ylittää 1.5 m, kertovat mineralisoitumien minimipaksuudesta.

Katajakankaan ja Kontioahon viuhkojen muoto on melko suora, mikä viittaa jäätikön kulkusuunnan säilyneen lähes samana viimeisen jäätiköitymisvaiheen aikana. Sekä Katajakankaan että Kontioahon viuhkojen keskiosissa on kaksi aukkoa ja aukon jälkeen lohkarereiden koko ja lukumäärä kasvavat (Kuva 7). Suurempi lohkarere koko ja suurempi lohkarereiden määrä viuhkan keskellä viittaa erilliseen viuhkaan (vrt. Saltikoff 1985) ja siihen, että näiden aukkojen pohjoispuolella voisi olla Kontioahon ja Katajakankaan kaltaisia mineralisaatioita. On syytä kuitenkin ottaa huomioon, että joidenkin aukkojen alueella maasto on kosteaa suota, mikä hankaloittaa lohkarereiden löytämistä ja voi selittää näin lohkarereiden puuttumisen näiltä alueilta.

Honkamäen pohjoispuolelta alkava viuhka on selvästi hajaantuneempi, kuin Katajakankaan ja Kontioahon viuhkat, mikä voisi selittyä Honkamäen alueen laserkeilausaineistosta havaittavilla muinaisilla rantamuodostumilla. Nämä rantamuodostumat viittaavat siihen, että jäätikön muodostamien moreeniselänteiden pintaosat ovat huuhtoutuneet ja näin ollen moreeniaines on muuttanut paikkaansa alkuperäisestä kerrostumisympäristöstään, mutta asettunut kuitenkin suhteellisen lähelle lähtöpaikkaansa (vrt. Saltikoff 1985).

Vertailu vuosina 2016–2018 ja 1982–1985 löydettyjen lohkareiden löytöpaikkojen välillä osoittaa, että lohkare-etsintää on pääosin tehty eri alueilla. Tässä tutkimuksessa arvioitiin että noin kymmenellä lohkareella on selvästi samat koordinaatit, minkä takia on mahdollista että nämä lohkareet on tunnistettu kahdesti ja esiintyvät lohkarekannassa tuplana. Koordinaattien epätarkkuudesta johtuen, on myös mahdollista, että näitä toistamiseen paikannettuja lohkareita on enemmänkin.

## **9.2.Lohkareluokittelu ja Otanmäen alueen REE-potentiaali**

Tutkimuksen keskeinen tavoite eli lohkareiden luokittelu toimii pääasiassa hyvin ja sitä voidaan käyttää apuna myös lohkareiden lähtöpaikan arvioinnissa. Yhteenvetona luokittelusta mainittakoon, että tyyppin 1 ja 2 lohkareet erottavat toisistaan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  ja  $\text{SiO}_2$ -pitoisuudet: tyyppin 1 lohkareissa on korkeampi  $\text{SiO}_2$ -pitoisuus kuin tyyppin 2 lohkareissa ja tyyppissä 2  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - ja  $\text{K}_2\text{O}$ -pitoisuudet ovat korkeampia kuin tyyppissä 1. Tyyppin 3 lohkareet erottuvat muista lohkareista peralkalisen kokokivikoostumuksen perusteella, tyyppin 4 lohkareita karakterisoi muita tyyppejä merkittävästi korkeampi Th-pitoisuus ja tyyppin 5 lohkareita korkea F-pitoisuus.

Tyyppin 1 lohkareet todettiin vastaavan geokemiallisessa vertailussa pääosin hyvin Katajakankaan mineralisaatiota ja tutkimuksessa saatiin viitteitä myös siitä, että tämä tunnettu mineralisaatio voi olla kooltaan suurempi, kuin on aiemmin oletettu. Suurin osa lantanideista tyyppissä 1 esiintyy allaniitissa, jolle ei toistaiseksi ole



kehitetty taloudellisesti kannattavaa rikastusteknistä ja hydrometallurgista prosessia lantanidien erottamiseksi (Verbaan et al. 2015).

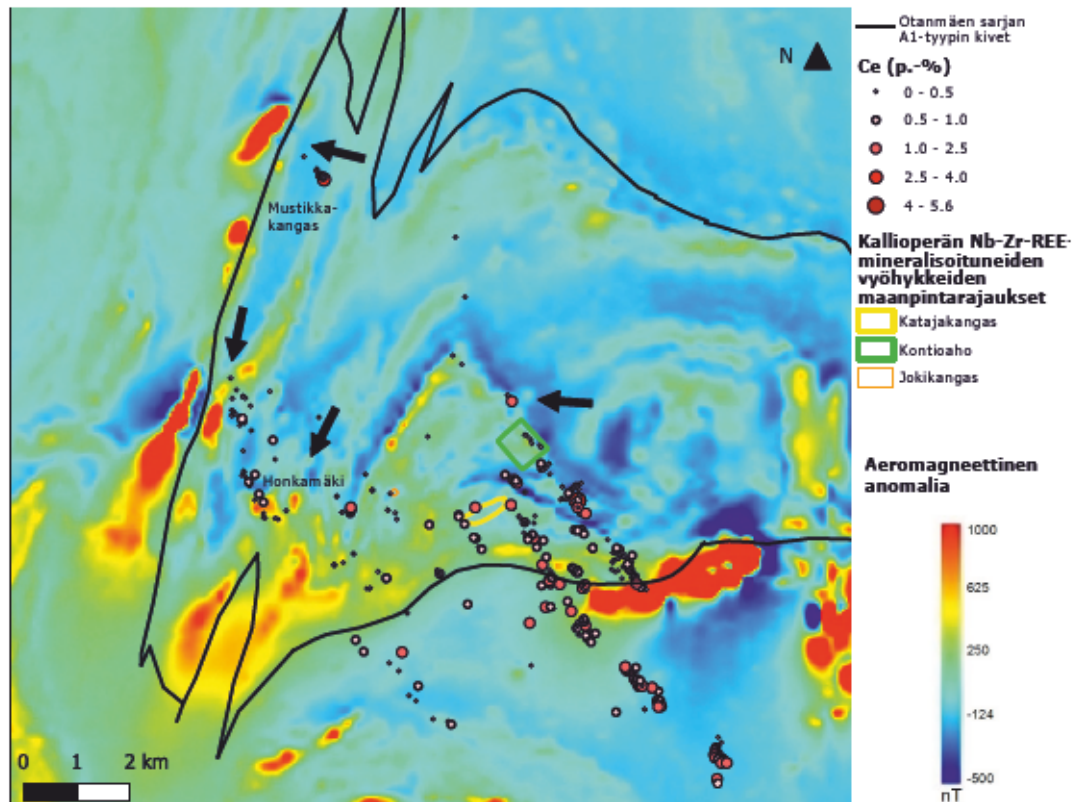
Tyypin 2 lohkareilla on merkittävää hajontaa niiden geokemiallisessa koostumuksessa ja fysikaalisissa ominaisuuksissa. Fysikaalisissa ominaisuuksissa hajontaa on erityisesti lohkarekoossa ja magneettisuudessa (kpl 8.3.). Tyypin 2 geokemiallinen hajonta näkyy parhaiten kuvissa 22–24, joissa noin 10–15% tyypin 2 lohkareista poikkeaa selkeästi muista tyypin 2 lohkareista. Kuvien perusteella tyypin 2 geokemiallisen jakautumiseen näyttäisi vaikuttavan eniten  $\text{SiO}_2$ - ja  $\text{FeO}_{\text{tot}}$ -pitoisuudet. Tyypin 2 lohkareet voitaisiin jatkossa jakaa alaryhmiin esimerkiksi Si- ja Fe-pitoisuuksien tai magneettisuuden perusteella. Lisäksi kuvassa 34 on nähtävillä hieman hajontaa tyypin 2 lohkareiden välillä erityisesti alkuaineilla Nb, Zr, Hf ja HREE. Myös Kontioahon mineralisoituneen vyöhykkeen kivissä on vastaavaa hajontaa edellä mainituilla alkuaineilla (Kuvat 29 ja 34), mutta on silti todennäköistä, että kaikki tyypin 2 lohkareet eivät ole peräisin Kontioahon mineralisaatiosta. Tätä tukee se, että osa tyypin 2 lohkareista on löydetty Kontioahon mineralisoituneen vyöhykkeen oletetun maanpintarajauksen pohjois- ja länsipuolelta.

Tyypin 3 lohkareet eivät niiden löytöpaikan ja mineralogisen koostumuksen perusteella voi olla peräisin tunnetuista mineralisaatiosta, eli niiden lähtöpaikka on vielä löytämättä. Tyypin 3 lohkareet on löydetty läheltä toisiaan ja niiden muoto on pääosin kulmikas, mikä viittaa siihen, että ne eivät ole kulkeutuneet kovin kaukaa löytöpaikkaansa (vrt. Saltikoff 1985). Tyyppien 4 ja 5 lohkareiden lähtöpaikkaa ei ole myöskään paikannettu. Vaikka tyypin 4 lohkareissa esiintyy taloudellisessa mielessä mielenkiintoisia lantanidimineraaleja, kuten monatsiittia ja REE-fluorokarbonaattia, on syytä huomata, että nämä lohkareet ovat kooltaan huomattavasti pienempiä kuin muut Otanmäen alueen lohkareet ja niiden muoto on myös pääosin todettu kulmistaan pyöristyneiksi (Äikäs 1990), mikä viittaa niiden lähtöalueen tai alueiden olevan hyvin pieniä ja/tai pistemäisiä. Tyypin 5 lohkareet ovat kooltaan melko suuria, mutta niitä on löydetty vain 3 kappaletta ja niiden löytöpaikat ovat hajaantuneet laajalle alueelle, minkä takia on hyvin todennäköistä, että ne ovat peräisin jostain kauempaa tai yksittäisistä pistemäisistä lähteistä (vrt. Saltikoff 1985).

Mineralogisissa koostumusmittauksissa selvisi, että allaniittia on keskimäärin 15 p.-% kaikissa lohkareissa ja keskimääräinen TREO-pitoisuus allaniitissa on noin 18 p.-%, mikä tekee allaniitista merkittävimmän lantanidien kantajamineraalin pääosassa lohkareista. Myös zirkonia esiintyy lohkareissa paikoin runsaasti, jopa >5 p.-%, mutta lantanidien pitoisuudet zirkonissa ovat yleensä pieniä (<1 p.-% TREO). Nb-REE-Th-U-oksideissa, REE-fluorokarbonaatissa ja monatsiitissa TREO-pitoisuudet voivat olla suuria, jopa yli 50 p.-%, mutta kyseisten lantanidimineraalien painoprosenttiosuus on pääosin alhainen, yleensä <1 p.-%.

Verrattaessa Otanmäen alueen lohkareita muihin tunnettuihin lantanidiesiintymiin maailmalla (kpl 3), muistuttavat ne mineralogialtaan ja geokemialtaan eniten peralkalisiin graniitteihin liittyviä esiintymiä. Tämä siksi, että lohkareita karakterisoivat pääosin korkeat SiO<sub>2</sub>-pitoisuudet sekä graniittinen tai kvartsirikas mineraalikoostumus. Lisäksi Kontioahon ja Katajakankaan mineralisoituneiden vyöhykkeiden synty on liitetty Otanmäen alueella laaja-alaisesti esiintyvään peralkaliseen-metalumiiniseen alkalimaasälpägraniittiin (Kärenlampi et al. 2020).

Kaiken kaikkiaan Otanmäen alue on potentiaalinen Kontioahon vyöhykkeen kanssa samankaltaisen lantanidimineralisaation löytymiselle Honkamäen alueelta tai sen luoteispuolelta (Kuva 35). Sekä kuvassa 35 että Otanmäen alueen geofysikaalisia mittauksia käsittelevässä raportissa (Lahti et al. 2018), voidaan nähdä, että Kontioahon mineralisoitunut vyöhyke erottuu ympäröivistä kivistä magneettisessa anomaliakartassa kohtalaisen hyvin, minkä takia voitaisiin olettaa että myös Honkamäen viuhkan lohkareiden lähtöpaikka erottuu kartassa magneettisuudellaan. On kuitenkin syytä huomata, että Honkamäen luoteispuolella on tavattu kuvassa 35 punaisella näkyvä voimakkaasti magneettinen gabrointrusio (Kuva 3, kpl 5.2.), joka saattaa vääristää alueen magneettista anomaliaa merkittävästi. Lisäksi on syytä huomata, että Honkamäen viuhkan lohkareiden Ce-pitoisuus vaikuttaa pääosin olevan pienempi kuin Kontioahon viuhkassa (Kuva 35).



Kuva 35. Otanmäen alueelta löydettyjen REE-Nb-Zr-mineralisoituneiden lohcareiden löytöpaikat ja symbolin koko kasvavan Ce-pitoisuuden mukaan. Nuolella on esitetty malminetsinnällisesti mielenkiintoisia alueita. Taustakarttana aeromagneettinen anomaliakartta, joka perustuu GTK:n matalalentoaineistoon (Saatavilla: <http://gtkdata.gtk.fi/MDaE/index.html> sivulla vierailtu 06/2020) ja Otanmäen sarjan A1-tyyppin syväkivien esiintymisalue (musta viiva) (Kärenlampi et al. 2020).

Lisäksi Otanmäen alueella on kohtalainen potentiaali löytää tyyppin 3 peralkalisen graniitin isännöimä lantanidimineralisoituma Mustikkakankaan luoteispuolelta (Kuva 35). Tutkimuksessa todettiin tyyppin 3 lohcareiden vastaavan koostumukseltaan peralkalisia graniitteja, minkä takia on selvää että myös niiden isäntäkilaji on todennäköisesti peralkalinen graniitti. Kuvassa 35 voidaan nähdä, että Otanmäen peralkalisten graniittien esiintyminen rajoittuu Mustikkakankaan luoteispuolella voimakkaasti magneettiseen gabro-intruusioon ja arkeaiseen pohjakompleksiin, jotka ovat siirroskontaktissa Otanmäen sarjan A1-tyyppin kiviin (Kuva 3, kpl 5.2.). Koska Otanmäen A1-tyyppin kiviä ei ole tavattu kuvassa 35 esitettyjen rajojen ulkopuolella (Kärenlampi et al. 2019), on hyvin todennäköistä, että tyyppin 3 lohcareet ovat kulkeutuneet löytöpaikkaansa alle 1 km etäisyydeltä luoteesta.



Niin kuin jo kappaleessa 9.1. todettiin, alueella on myös kohtalainen mahdollisuus siihen, että tunnetut Katajakankaan ja Kontioahon mineralisoituneet vyöhykkeet ovat laajempia kuin on aiemmin luultu. Tätä tukee lohcareiden fysikaalisten ominaisuuksien (kpl 9.1.) lisäksi myös Kontioahon mineralisoituneen vyöhykkeen pohjoispuolella tavattu yksittäinen n. 52 p.-% allaniittia sisältävä lohkar (Liite 8, näytetunnus JJJ-18-L144). Katajakankaan viuhkassa on syytä ottaa huomioon, että Kuvassa 35 A1-typin kivien esiintyminen kallioperässä rajoittuu noin kilometrin päähän Katajakankaasta sen kaakkoispuolella, minkä takia on hyvin epätodennäköistä, että Katajakankaan mineralisoitunut vyöhyke rajoittuisi A1-typin kivien ulkopuolelle, vaikka lohcareviuhkan tulkinta niin osoittaa.

## 10. JOHTOPÄÄTÖKSET

1) Otanmäen alueelta on paikannettu kohonneen radioaktiivisuuden perusteella vuosina 1981–1985 ja 2016–2018 yhteensä noin 350 jäätikön kuljettamaa lohkareta, joissa on kohonneita REE-, Nb- ja Zr-pitoisuuksia. Lohkare-etsintää on tehty 12 x 12 km kokoisella alueella, jossa lohcareet muodostavat kolme samansuuntaista ja osittain ”katkonaista” pääviuhkaa, joiden pituudet vaihtelevat välillä 4.4–7.8 km. Pääosa lohcareista on löydetty tunnettujen Katajakankaan ja Kontioahon REE-Nb-Zr-mineralisoituneiden vyöhykkeiden etelä- ja kaakkoispuolelta, missä lohcareet muodostavat kaksi pääviuhkaa. Pääviuhkojen lisäksi lohcareet muodostavat alueella 3 lyhyempää viuhkaa, joiden pituus on noin 1 km. Lohcareiden tyypillinen koko on 0.5x0.3x0.3 m.

2) Lohcareet voidaan luokitella viiteen eri tyyppiin kivien pää- ja hivenalkuaineakoostumuksen ja mineraalikoostumuksen perusteella. Tyypin 1 lohcareet ovat kvartsi-allaniittigneissejä, joissa on korkea  $\text{SiO}_2$ -pitoisuus. Tyypin 2 lohcareet ovat kvartsimaasälpägneissejä, joissa on korkeammat  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - ja  $\text{K}_2\text{O}$ -pitoisuudet kuin tyypin 1 lohcareissa. Tyypin 3 kivet ovat peralkalisia egiriinigraniitteja, joissa on korkeammat Na ja K pitoisuudet kuin muissa lohcareissa. Tyypin 4 lohcareet ovat toriittirikkaita gneissejä ja tyypin 5 lohcareet fluoriitti-amfibolirikkaita gneissejä.



3) Noin 95% Otanmäen alueelta löydettyistä lohkareista vastaa tyyppejä 1 ja 2, joista pääosan arvioitiin löytöpaikan, geokemian ja mineralogian perusteella vastaavan tunnettuja mineralisaatioita, Katajakangasta ja Kontioahoa, minkä takia löydettyistä lohkareista suurin osa on todennäköisesti peräisin joko tunnetuista tai niiden kanssa samanlaisista kallioperän mineralisoituneista vyöhykkeistä. Osa lohkareista on selvästi mineraalikoostumuksen ja/tai löytöpaikan perusteella peräisin vielä löytymättömistä lähteistä, minkä takia alueella on potentiaalia löytää uusia mineralisoituneita vyöhykkeitä. Honkamäen pohjoispuoli on potentiaalinen Kontioahon kaltaisten mineralisoiutumien löytymiselle. Mustikkakankaan viuhkan luoteispuolella on kohtalainen potentiaali löytää peralkalisessa graniitissa esiintyvä juonityyppinen mineralisoituma. Lisäksi on kohtalaisen todennäköistä, että Kontioahon ja Katajakankaan mineralisoituneet vyöhykkeet ovat laajempia kuin on aiemmin oletettu.

4) Allaniitti-(Ce) on Otanmäen alueelta löydettyissä lohkareissa merkittävin lantanidien kantajamineraali ja se sisältää pääasiassa kevyitä lantanideja (8–28 p.-% LREO, sis.  $\text{La}_2\text{O}_3$ - $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ). Myös zirkonia esiintyy lohkareissa paikoin runsaasti, mutta lantanidien määrä mineraalissa on pieni. Lisäksi lohkareissa esiintyy pieniä määriä Nb-REE-U-Th-oksidimineraaleja, joissa esiintyy vaihtelevasti raskaita harvinaisia maametalleja (0–24 p.-% HREO sis.  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ - $\text{Lu}_2\text{O}_3$ + $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). Muita lohkareissa esiintyviä lantanidimineraaleja ovat REE-fluorokarbonaatti ja monatsiitti, mutta myös niiden esiintyminen on vähäistä löydettyissä lohkareissa.

## 11. KIITOKSET

Työn valmistumisesta haluan kiittää:

- 1) Peter Sorjonen-Wardia (GTK) ja EIT RawMaterialsin inSPECTor-hanketta rahallisesta tuesta ICP-OES/-MS-menetelmillä tehtyihin kokokivianalyysihin
- 2) Marja Lehtosta (GTK) ohjauksesta FE-SEM-laitteella Suomen geotieteiden tutkimuslaboratoriossa
- 3) Leena Palmua ja Marko Moilasta ohjauksesta mikroanalysaattorilla Oulun yliopiston Materiaalianalyysikeskuksessa
- 4) Sari Forssia (Oulun yliopisto) kiillotettujen ohuthieiden valmistuksesta
- 5) graduohjaajia Kimmo Kärenlampea ja Kirsi Luolavirtaa (Oulun yliopisto)

## 12. KIRJALLISUUSLUETTELO

- Agangi, A., Kamenetsky, V. S., & McPhie, J. (2010). The role of fluorine in the concentration and transport of lithophile trace elements in felsic magmas: insights from the Gawler Range Volcanics, South Australia. *Chemical Geology*, 273(3–4), 314–325.
- Anders, E., & Grevesse, N. (1989). Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica acta*, 53(1), 197–214.
- Arzamastsev, A. A., Glaznev, V. N., Arzamastseva, L. V., Bea, F., & Montero, P. (2001). Kola alkaline province in the Paleozoic: evaluation of primary mantle magma composition and magma generation conditions. *Russian Journal of Earth Sciences*, 3(1).
- Atencio, D., Andrade M., Christy A., Gieré R., & Kartashov P., (2010). The Pyrochlore Supergroup of Minerals: Nomenclature. *The Canadian Mineralogist*. 48. 673–698.
- Audétat, A., Pettke, T., Heinrich, C. A., & Bodnar, R. J. (2008). Special paper: the composition of magmatic-hydrothermal fluids in barren and mineralized intrusions. *Economic Geology*, 103(5), 877–908.
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1285–1303.
- Bea, F. (2015). Geochemistry of the lanthanide elements. In XXXV Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía Huelva, June 30–July 3, 2015.
- Bonin, B. (2007). A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 97(1–2), 1–29.
- Broska, I., Petrik, I., & Williams, C. T. (2000). Coexisting monazite and allanite in peraluminous granitoids of the Tribec Mountains, Western Carpathians. *American Mineralogist*, 85(1), 22–32.
- Buda, G. & Nagy, G. (1995). Some REE-bearing accessory minerals in two types of Variscan granitoids, Hungary. *Geol. Carpathica* 46, 67–78.
- Castor, S. B. (2008). Rare Earth Deposits of North America. *Resource Geology*, 58(4), 337–347.
- Černý, Petr & Ercit, T. Scott. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*. 43. 2005–2026.
- Chakhmouradian, Anton & Wall, F.. (2012). Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets (and More). *Elements*. 8. 333–340.
- Chakhmouradian, Anton & Zaitsev, A.. (2012). Rare Earth Mineralization in Igneous Rocks: Sources and Processes. *Elements*. 8. 347–353.
- Cotton, S. (2013). Lanthanide and actinide chemistry. John Wiley & Sons.
- Dollase, W. (1973). Mössbauer spectra and iron distribution in the epidote-group minerals. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 138(1–6), 41–63.
- Dollase, W. A. (1971). Refinement of the crystal structures of epidote, allanite and hancockite. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 56(3–4 Osa 1), 447–464.
- Donnay, G. & Donnay, J.D.H. (1953). The crystallography of bastnaesite, parisite, roentgenite and synchysite. *Am. Mineral.* 38, 932–963.
- Dostal, J. (2016). Rare Metal Deposits Associated with Alkaline/Peralkaline Igneous Rocks. Reviews in economic geology: Rare earth and critical elements in ore deposits. *Julkaisija: Society of Economic Geologists*.
- Eby, G. N. (1992). Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7), 641–644.

- Eby, G. N. (1990). The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26(1-2), 115–134.
- Emsbo, P., McLaughlin, P. I., du Bray, E. A., Anderson, E. D., Vandenbroucke, T., & Zielinski, R. A. (2016). Rare earth elements in sedimentary phosphorite deposits: a global assessment. In P. L. Verplanck & M. W. Hitzman (Eds.), *Rare earth and critical elements in ore deposits* (Vol. 18, s. 101–113). Littleton, CO, USA: Society of Economic Geologists.
- Ercit, T. Scott. (2005). Identification and alteration trends of granitic-pegmatite-hosted (Y,REE,U,Th)-(Nb,Ta,Ti) oxide minerals: A statistical approach. *The Canadian Mineralogist*. 43. 1291–1303.
- Finch, R. J., & Hanchar, J. M. (2003). Structure and chemistry of zircon and zircon-group minerals. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 53(1), 1–25.
- Frost, B. R. & Frost, C.D. (2008). A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Journal of Petrology* 49, 1955–1969.
- Frost, B. R., Arculus, R. J., Barnes, C. G., Collins, W. J., Ellis, D. J. & Frost, C. D. (2001). A geochemical classification of granitic rocks. *Journal of Petrology* 42, 2033–2048.
- Gieré R, Virgo D. & Popp R.K. (1999). Oxidation state of iron and incorporation of REE in igneous allanite. *Journal of Conference Abstracts* 4: s. 721
- Giere, R., & Sorensen, S. S. (2004). Allanite and Other REE-Rich Epidote-Group Minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56(1), 431–493.
- Gilbert, C. D., & Williams-Jones, A. E. (2008). Vapour transport of rare earth elements (REE) in volcanic gas: Evidence from encrustations at Oldoinyo Lengai. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(4), 519–528.
- Graedel, T. E. Harper E. M., Nassar, N. T. P., Nuss, P. & Reck B., (2015). Criticality of metals and metalloids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- GTK (2009). Maapeitepaksuus 1:1 000 000 digitaalinen kartta-aineisto. Perustuu Maaperä 1:1 000 000 kartta-aineiston tulkintaan. Saatavilla: <http://gtkdata.gtk.fi/Maankamara/index.html>
- Gysi, A. P., & Williams-Jones, A. E. (2015). The thermodynamic properties of bastnäsite-(Ce) and parisite-(Ce). *Chemical Geology*, 392, 87–101.
- Haas, J. R., Shock, E. L., & Sassani, D. C. (1995). Rare earth elements in hydrothermal systems: Estimates of standard partial molal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(21), 4329–4350.
- Haque N., Hughes A.E., Lim, K. & Vernon C. (2014). Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact. *Resources*. 3. 614–635.
- Haire R.G., Eyring L (1994). Comparisons of the binary oxides. In: Gschneider KA, Eyrting L, Choppin GR, Lander GR (eds) *Handbook of the physics and chemistry of rare earths*, vol 18, chapter 125, 413–505.
- Hanski, E. & Huhma, H. (2005). Central Lapland greenstone belt. In: Lehtinen, M. Nurmi, P.A. & Rämö, O.T. (eds.) *Precambrian geology of Finland – Key to the evolution of the Fennoscandian Shield*. Elsevier, Amsterdam, 139–94.
- Hanski, E. & Melezhik, V. A. (2013). Litho- and chronostratigraphy of the Paleoproterozoic Karelian formations. In: Melezhik, V., Prave, A.R., Fallick, A.E., Kump, L.R., Strauss, H., Lepland, A. & Hanski, E.J. (eds.) *Reading the Archive of Earth's Oxygenation, Volume 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as Context for the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project*, Springer-Verlag, 39–110.



- Harkins, W.D. (1917). "The Evolution of the Elements and the Stability of Complex Atoms". *Journal of the American Chemical Society*. 39 (5): 856–879.
- Himmi, R. (1975). Outokumpu Oy:n Korsnäs ja Petolahden kaivosten vaiheita. *Vuoriteollisuus – Bergshanteringen* 33, 35–38.
- Hirvas, H., (1980). Moreenistratigrafiasta ja sen merkityksestä malminetsinnässä. *Geologi* 32, 33–37.
- Hoshino, M., Kimata, M., Shimizu, M., & Nishida, N. (2007). Minor-element systematics of fluorapatite and zircon inclusions in allanite-(Ce) of felsic volcanic rocks from three orogenic belts: implications for the origin of their host magmas. *The Canadian Mineralogist*, 45(6), 1337–1353.
- Hugg, R., (1985a). Katajakangas. Geologinen malmiarvio. Report OU 12/85, Rautaruukki Oy Malminetsintä, 13 s.
- Hugg, R., (1985b). Kontioaho. Geologinen malmiarvio. Report OU 11/85, Rautaruukki Oy Malminetsintä, 14 s.
- Hugg, R., (1985c). Tutkimustyöt valtausalueella Jokikangas 1. Tutkimustyöselostus OU 11/85. Rautaruukki Oy.
- Hugg, R., & Heiskanen, V., (1986). Otanmäen alueen niobi-lantaniditutkimukset. Report OU 28/85, Rautaruukki Oy Malminetsintä, 14 s.
- Huhma, H., Hanski, E., Kontinen, A., Vuollo, J., Mänttari, I. & Lahaye, Y., (2018). Sm–Nd and U–Pb isotope geochemistry of the Paleoproterozoic mafic magmatism in eastern and northern Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 405, 150.
- Jahn, B.M., Litvinovsky, B.A., Zandvilevich, A.N., & Reichow, M., (2009). Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian-Transbaikalian belt: Evolution, petrogenesis and tectonic significance: *Lithos*, v. 113, 521–539.
- Jordan, S.C., Jowitt, S.M., & Cas, R.A.F., (2015). Origin of temporal-compositional variations during the eruption of Lake Purumbete Maar, Newer Volcanics Province, southeastern Australia: *Bulletin of Volcanology*, v. 77, 1–15.
- Kalashnikov, A. O., Konopleva, N. G., Pakhomovsky, Y. A., & Ivanyuk, G. Y. (2016). Rare Earth Deposits of the Murmansk Region, Russia—A Review. *Economic Geology*, 111(7), 1529–1559.
- Kontinen, A. (2002). Palaeoproterozoic tectonothermal overprint in the Eastern Finland Archaean Complex and some thoughts of its tectonic setting. Teoksessa: Korsman, K., Lestinen, P. (eds.), Raahelähtö Symposium, Extended Abstracts. Geological Survey of Finland, Report K21.42/2002/1, 42–62.
- Kontinen, A., Paavola, J. & Lukkari, H. (1992). K–Ar ages of hornblende and biotite from Late Archaean rocks of eastern Finland – interpretation and discussion of tectonic implications. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 365, 31.
- Kontinen, A. and Paavola, J. (2006). A preliminary model of the crustal structure of the eastern Finland Archaean Complex between Vartiuss and Vieremä, based on constraints from surface geology and FIRE 1 seismic survey. *Geological Survey of Finland, Special Paper* 43, 223–240, 5 figures.
- Kontinen, A., Huhma, H., Lahaye, Y., O'Brien, H. (2013). New U–Pb zircon age, Sm–Nd isotope and geochemical data for Otanmäki suite granites in the Kainuu area, central Finland. Teoksessa: Hölttä, P. (Ed.), Current Research: GTK Mineral Potential Workshop, Kuopio, May 2012. Geological Survey of Finland, Report of Investigation, 198, pp. 65–69.
- Korsman, K., Korja, T., Pajunen, M. & Virransalo, P. (1999). The GGT/SVEKA transect, structure and evolution of the continental crust in the Paleoproterozoic Svecofennian orogen in Finland. *International Geology Review* 41, 287–333.

- Kuivasaari, T., Torppa, A., Äikäs, O. & Eilu, P. (2012). Otanmäki V-Ti-Fe. Teoksessa: Eilu, P. (ed.), *Mineral Deposits and Metallogeny of Fennoscandia*. Geological Survey of Finland, Special Paper 53, 284–286.
- Kärenlampi K., Kontinen A., Huhma H. & Hanski E. (2019). Geology, geochronology and geochemistry of the 2.05 Ga gneissic A1-type granites and related intermediate rocks in central Finland: implication for the tectonic evolution of the Karelia craton margin.
- Kärenlampi K., Kontinen A., Hanski E., Huhma H., Lahaye Y., Krause J. & Heinig T. (2020). Age and origin of the Nb-Zr-REE mineralization in the Paleoproterozoic A1-type granitoids at Otanmäki, central Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland (painossa)*.
- Laajoki, K. (2005). Karelian supracrustal rocks. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P.A. & Rämö, O.T. (eds.) *Precambrian Geology of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield*. *Developments in Precambrian Geology* 14, 279–342.
- Lahti, I., Salmirinne, H., Kärenlampi, K. & Jylänki, J. (2018). Geophysical surveys and modelling of Nb-Zr-REE deposits and Fe-Ti-V ore-bearing gabbros in the Otanmäki area, central Finland. Geological Survey of Finland, Open File Work Report 75/2018.
- Lahtinen, R., Huhma, H., Kontinen, A., Kohonen, J. & Sorjonen-Ward, P., (2010). New constraints for the source characteristics, deposition and age of the 2.1–1.9 Ga metasedimentary cover at the western margin of the Karelian Province. *Precambrian Research* 176, 77–93.
- Lahtinen, R., Korja, A. & Nironen, M. (2005). Paleoproterozoic tectonic evolution. In: Lehtinen, M., Nurmi, P.A. & Rämö, O.T. (eds.) *Precambrian Geology of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield*. Elsevier B.V., Amsterdam, 481–532.
- Le Maitre, R.W. (2002). *Igneous rocks: A classification and glossary of terms*, 2nd ed.: Cambridge, UK, Cambridge University Press, 236 s.
- Lewis, A. J., Komminou, A., Yardley, B. W. D. & Palmer, M. R. (1998). Rare earth element speciation in geothermal fluids from Yellowstone National Park, Wyoming, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(4), 657–663.
- Linnen R., Samson I, Williams-Jones A. & Chakhmouradian A. (2014): *Geochemistry of the Rare-Earth Element, Nb, Ta, Hf, and Zr Deposits*.
- Loiselle, M. C. (1979). Characteristics and origin of anorogenic granites. In *Geological Society of America Abstracts with Programs* (Vol. 11, s. 468).
- Long K, Gosen B., Foley N. & Cordier D. (2010). *The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States: A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective*.
- Luo, Y., & Ayers, J. C. (2009). Experimental measurements of zircon/melt trace-element partition coefficients. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(12), 3656–3679.
- Mariano A. ja Mariano A. Jr., (2012). *Rare Earth Mining and Exploration in North America. Elements: Rare Earth Elements*.
- Marinsky J., Glendenin L. & Coryell C. (1947). The Chemical Identification of Radioisotopes of Neodymium and of Element 61, *J. Am. Chem. Soc.*
- Marmo, V., Hoffren, V., Hytönen, K., Kallio, P., Lindholm, O. & Siivola, J., (1966). On the granites of Honkamäki and Otanmäki, Finland, with special reference to the mineralogy of accessories. *Bulletin de la Commission Géologique de Finland* 221, 34 s.
- Matsui, Y., Onuma, N., Nagasawa, H., Higuchi, H. & Banno, S. (1977). Crystal structure control in trace element partition between crystal and magma. *Bull. Soc. Fr. Mineral. Crystal.*, v.100, s.315–32

- McDonough, W. F., & Sun, S. S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3–4), 223–253.
- McLennan S.M. (2012). *Geology, geochemistry, and natural abundances of the rare earth elements*. Teoksessa: Atwood DA (ed) *The rare earth elements—fundamentals and applications*. Wiley, New York, pp 1–19
- Migdisov, A. A., Williams-Jones, A. E. & Wagner, T. (2009). An experimental study of the solubility and speciation of the Rare Earth Elements (III) in fluoride- and chloride-bearing aqueous solutions at temperatures up to 300 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(23), 7087–7109.
- Migdisov, A. A., & Williams-Jones, A. E. (2014). Hydrothermal transport and deposition of the rare earth elements by fluorine-bearing aqueous liquids. *Mineralium Deposita*, 49(8), 987–997.
- Montel, J. M. (1993). A model for monazite/melt equilibrium and application to the generation of granitic magmas. *Chemical Geology*, 110(1–3), 127–146.
- Möller P., Cerny P., & Saupé F. (1986). *Lanthanides, Tantalum and Niobium: Mineralogy, Geochemistry, Characteristics of Primary Ore Deposits, Prospecting, Processing and Applications*. Proceedings of a workshop in Berlin, (Vol. 7). Springer Science & Business Media.
- Möller, P., Rosenthal, E., Dulski, P., & Geyer, S. (2009). Characterization of recharge areas by rare earth elements and stable isotopes of H<sub>2</sub>O. In *The Water of the Jordan Valley* (s. 123–148). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Nardi, L. V., & de Fátima Bitencourt, M. (2009). A-type granitic rocks in post-collisional settings in southernmost Brazil: their classification and relationship with tectonics and magmatic series. *The Canadian Mineralogist*, 47(6), 1493–1503.
- Ni, Y., Hughes, J. M., & Mariano, A. N. (1995). Crystal chemistry of the monazite and xenotime structures. *American Mineralogist*, 80(1–2), 21–26.
- Nironen, M. (2017). Guide to the geological map of Finland–Bedrock 1: 1 000 000. Geological Survey of Finland, Special Paper, 60, 41–76.
- Oddo, Giuseppe (1914). "Die Molekularstruktur der radioaktiven Atome". *Zeitschrift für Anorganische Chemie*. 87: 253–268.
- Oliveira J. F., Saraiva S. M., Pimenta J. S., & Oliveira A. P. A. (2001). Kinetics of pyrochlore flotation from Araxá mineral deposits. *Minerals Engineering*, 14(1), 99–105.
- Pajunen, M. & Poutiainen, M. (1999). Paleoproterozoic prograde metasomatic-metamorphic overprint zones in Archaean tonalitic gneisses, eastern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 71, 73–132.
- Pearson R., (1963). Hard and Soft Acids and Bases. *J. Am. Chem. Soc.* 85 (22): 3533–3539.
- Peltonen, P., Kontinen, A., Huhma, H., & Kuronen, U. (2008). Outokumpu revisited: new mineral deposit model for the mantle peridotite-associated Cu–Co–Zn–Ni–Ag–Au sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 33(3–4), 559–617.
- Petrík I, Broska I, Lipka J, Šíman P (1995). Granitoid Allanite-(Ce) Substitution Relations, Redox Conditions and REE Distributions (on an Example of I-Type Granitoids, Western Carpathians, Slovakia). *Geologica Carpathica* 46:79–94.
- Potrasson, F., Oelkers, E., Schott, J., & Montel, J. M. (2004). Experimental determination of synthetic NdPO<sub>4</sub> monazite end-member solubility in water from 21 °C to 300 °C: implications for rare earth element mobility in crustal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(10), 2207–2221.
- Prowatke, S., & Klemme, S. (2005). Effect of melt composition on the partitioning of trace elements between titanite and silicate melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3), 695–709.



- Puranen 1988: Modelling of glacial transport of basal tills in Finland. Geological Survey of Finland, Report of Investigation 81. 36 sivua, 15 kuvaa ja 1 liite.
- Rubatto, D., & Hermann, J. (2007). Experimental zircon/melt and zircon/garnet trace element partitioning and implications for the geochronology of crustal rocks. *Chemical Geology*, 241(1–2), 38–61.
- Rudnick, R. L., & Gao, S. (2003). Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 1–64.
- Saltikoff B. (1985). Lohkaretiesijän opas
- Sanematsu K., Watanabe, Y., (2016). Characteristics and Genesis of Ion Adsorption-Type Rare Earth Element Deposits.
- Sarapää O., Al Ani T., Lahti S., Lauri L., Sarala P., Torppa A. & Kontinen A. (2013). Rare earth exploration potential in Finland. *Journal of Geochemical Exploration*.
- Sarapää, O., Lauri, L. S., Ahtola, T., Al-Ani, T., Grönholm, S., Kärkkäinen, N., Lintinen, P., Torppa, A. & Turunen, P. (2015). Discovery potential of hi-tech metals and critical minerals in Finland
- Sengupta, D., & Van Gosen, B.S., (2016). Placer-type rare earth element deposits: Reviews in *Economic Geology*, v. 18, s. 81–100.
- Sheard, E. R., Williams-Jones, A. E., Heiligmann, M., Pederson, C., & Trueman, D. L. (2012). Controls on the concentration of zirconium, niobium, and the rare earth elements in the Thor Lake rare metal deposit, Northwest Territories, Canada. *Economic Geology*, 107(1), 81–104.
- Sverjensky, D. A. (1984). Europium redox equilibria in aqueous solution. *Earth and Planetary Science Letters*, 67(1), 70–78
- Sørensen, H. (2001). Brief introduction to the geology of the Ilimaussaq alkaline complex, South Greenland, and its exploration history. In *The Ilimaussaq Alkaline Complex, South Greenland: Status of Mineralogical Research with New Results*; Sørensen, H., Ed.; *Geology of Greenland Survey Bulletin* (190); GEUS: Copenhagen, Denmark,
- Tuisku, P. (1997). An introduction to Paleoproterozoic (Svecofennian) regional metamorphism in Kainuu and Lapland, Finland. In: Evins, P., Laajoki, K. (eds.), *Archaean and Early Proterozoic (Karelian) Evolution of the Kainuu- Peräpohja Area, Northern Finland*. *Res Terrae* 13, 27–31.
- Vaasjoki, M., Kärki, A. & Laajoki, K., (2001). Timing of Paleoproterozoic crustal shearing in the central Fennoscandian Shield according to U-Pb data from associated granitoids, Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 73, 87–101.
- Vasyukova, O. & Williams-Jones, A. (2019). Partial melting, fractional crystallisation, liquid immiscibility and hydrothermal mobilisation – A ‘recipe’ for the formation of economic A-type granite-hosted HFSE deposits. *Lithos*. 105300.
- Verbaan, N., Bradley, K., Brown, J. & Mackie, S., (2015). A review of hydrometallurgical flowsheets considered in current REE projects. In: Simandl, G.J. and Neetz, M. (eds.), *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*, November 13-14, 2015, Victoria, British Columbia. British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3, s. 147–162.
- Verplanck P., & Hitzman M. (2016). Introduction: Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits, *Reviews in economic geology*, Society of economic geologists.
- Verplanck, P. L., Mariano, A. N., & Mariano Jr, A. (2016). Rare earth element ore geology of carbonatites. *Society of economic geologists*.
- Voncken, J. H. L. (2015). The Rare Earth Elements—A Special Group of Metals. *The Rare Earth Elements*, 1–13.



- Vuollo, J. & Huhma, H. (2005). Palaeoproterozoic mafic dykes in NE Finland. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P. A., Rämö, O. T. (eds.), *Precambrian Geology of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, s. 193–235.
- Warner, J.K. & Ewing, R. (1993). Crystal chemistry of samarskite. *American Mineralogist*. 78. 419–424.
- Weng Z., Jowitt S., Mudd G. & Haque N. (2015). Detailed Assessment of Global Rare Earth Element Resources: Opportunities and Challenges
- Wikimedia Commons (2008). Periodic table of the chemical elements. Tekijänä käyttäjä Cepheus.
- Williams-Jones, A. E., & Wood, S. A. (1992). A preliminary petrogenetic grid for REE fluorocarbonates and associated minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(2), 725–738.
- Williams-Jones A.E., Samson I.M., Olivo G.R. (2000). The genesis of hydrothermal fluorite-REE deposits in the Gallinas Mountains, New Mexico. *Econ Geol* 95:327–341
- Williams-Jones, A., Migdisov, A., Samson, I. (2012). Hydrothermal Mobilisation of the Rare Earth Elements – a Tale of “Ceria” and “Ytria”. *Elements: Rare Earth Elements*.
- Wood SA (1990). The aqueous geochemistry of the rare-earth elements and yttrium: 2. Theoretical predictions of speciation in hydrothermal solutions to 350C at saturation water vapor pressure. *Chemical Geology* 88: 99–125.
- Wood, S. A., & Williams-Jones, A. E. (1994). The aqueous geochemistry of the rare-earth elements and yttrium 4. Monazite solubility and REE mobility in exhalative massive sulfide-depositing environments. *Chemical Geology*, 115(1–2), 47–60 .
- Wu, C., (2008). Bayan Obo controversy: Carbonatite versus iron oxide-Cu-Au-(REE-U): *Resource Geology*, v. 58, s. 348–354.
- Xie, Yuling & Hou, Zengqian & Goldfarb, Richard & Guo, Xiang & Wang, Lei. (2016). Rare Earth Element Deposits in China. *Reviews in Economic Geology*. 18. 115–136.
- Äikäs O. (1990). Torium- ja niobi-lantanidimalmiihteet Vuolijoen Otanmäessä. Julkaisija: Geologian tutkimuskeskus.

## LIITTEET

Liite 1. Kannettavan XRF-spektrometrin mittaustulokset, Tyyppi 1

Näyte- tunnus	JAM- 18- L30	JL- 18- L104	JL- 18- L106	JL- 18- L110	JL- 18- L111	JL- 18- L113	JL- 18- L114	JL- 18- L118	JL- 18- L12	JL- 18- L120	JL- 18- L123	JL- 18- L124	JL- 18- L128	JL- 18- L137	JL- 18- L138	JL- 18- L14	JL- 18- L144	JL- 18- L146	JL- 18- L148	JL- 18- L15
SiO <sub>2</sub> (p.-%)	76.6	83.4	76.8	77.0	74.1	68.4	76.9	74.8	78.9	76.8	83.1	77.8	72.3	72.7	75.6	81.2	79.7	73.5	79.2	80.2
TiO <sub>2</sub>	0.33	0.14	0.12	0.21	0.24	0.4	0.22	0.22	0.30	0.16	0.16	0.45	0.40	0.26	0.43	0.14	0.20	0.27	0.16	0.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.27	1.95	4.17	4.20	3.31	4.8	3.43	5.51	3.73	2.72	2.67	6.58	5.32	5.69	3.86	2.37	4.65	4.32	2.63	2.23
FeO <sub>tot</sub>	4.39	1.79	2.37	2.35	2.81	13.2	6.84	1.97	3.29	2.32	2.21	2.20	2.69	2.14	4.92	1.98	2.78	6.62	4.32	3.72
MgO	0.58	0.39	1.24	0.17	1.28	0.6	1.03	0.67	0.86	0.40	0.42	0.51	0.46	0.34	0.77	0.73	0.68	0.81	0.34	0.56
CaO	1.53	4.54	1.71	4.67	3.36	3.9	3.69	3.83	5.62	7.40	2.45	1.20	8.91	7.11	4.97	3.63	3.13	10.87	4.46	1.04
K <sub>2</sub> O	4.54	0.41	1.40	1.70	1.20	0.5	0.12	3.36	2.45	0.56	0.20	1.59	2.96	0.99	1.07	0.64	0.15	2.39	0.12	0.14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.80	0.93	0.76	0.87	0.8	0.74	0.79	0.76	0.68	0.84	1.37	1.24	0.91	0.74	0.73	0.84	0.66	0.79	0.72
S	0.23	0.00	0.38	0.00	0.98	0.0	0	1.24	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	5.61	0.71	0.00	0.00	0.00	4.70
Tei	94.47	93.46	89.09	91.08	88.20	92.6	92.96	92.40	95.94	91.02	92.12	91.72	94.30	90.13	97.99	92.15	92.17	99.46	92.07	93.52
Nb (ppm)	1455	5894	2665	11467	3863	2543	3182	2635	4977	8558	5329	2412	1690	2699	4011	4419	2285	817	3282	5393
Ta	68	272	121	462	252	156	294	142	230	342	278	131	100	146	280	269	138	129	197	283
Zr	11137	6352	5868	6811	7676	18757	9622	9837	8738	5290	6068	25102	16669	9860	12160	7007	4129	11621	9247	6022
Hf	270	142	138	135	173	533	194	258	197	99	116	639	433	228	285	162	82	342	209	140
Th	259	955	701	991	979	492	1419	675	971	558	821	718	449	1125	1506	931	777	210	1345	888
U	38	165	151	188	127	77	156	69	84	130	193	43	52	117	126	123	107	45	73	125
Y	895	2444	1423	1972	1879	1180	2299	1359	1840	1145	2165	1219	1011	2145	2028	1791	2555	1209	1585	1898
La	1473	4471	2804	5675	2843	1881	4378	2112	3393	2235	3871	2361	1372	3404	4636	3350	3027	384	4046	4379
Ce	2892	9574	5792	10914	6302	4025	9461	4444	6938	4542	7890	4972	2855	7233	10167	7237	6687	1066	8669	9390
Pr	277	1047	515	912	387	467	957	418	609	437	808	457	328	702	691	732	678	246	934	890
Nd	974	4262	2530	4559	2595	1720	4207	1758	2732	1830	3625	2221	1172	3018	3564	3374	2783	636	3492	4054
Pb	79	191	152	232	277	94	220	164	324	178	178	96	90	220	231	177	117	63	164	173
V	17	3139	0	2941	3236	367	0	0	0	2700	0	21	16	2864	2414	0	3234	0	2723	0
Cr	0	1175	1358	1232	1391	201	999	0	0	703	0	0	16	976	968	0	1283	0	916	0
Cu	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	76
Zn	202	81	85	202	198	40	57	145	188	38	68	5	20	61	127	99	21	18	91	85
Ga	41	7	17	22	8	51	18	21	17	5	10	34	24	33	10	7	7	30	19	13
Rb	200	11	59	33	91	14	10	126	136	43	4	69	52	37	35	22	5	99	7	13
Sr	144	139	96	192	144	411	189	169	241	277	109	131	403	569	216	120	245	42	204	149
Ba	247	0	65	0	60	52	0	190	151	0	0	177	485	138	621	0	55	0	0	0
Sn	145	251	194	264	203	252	199	173	200	245	249	185	124	281	243	268	97	169	265	232

Néve- tunnus	JL- 18- L16	JL- 18- L17	JL- 18- L173	JL- 18- L179	JL- 18- L180	JL- 18- L181	JL- 18- L182	JL- 18- L183	JL- 18- L186	JL- 18- L189	JL- 18- L19	JL- 18- L190	JL- 18- L191	JL- 18- L194	JL- 18- L195	JL- 18- L199	JL- 18- L201	JL-18- L205	JL-18- L209	JL-18- L210
	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)	SiO <sub>2</sub> (p-%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.19	2.60	3.50	3.85	5.12	3.3	4.34	2.92	3.22	3.09	3.98	4.13	4.02	3.64	3.60	5.35	6.40	4.01	6.12	4.84
FeO <sub>tot</sub>	4.60	2.61	3.37	5.65	4.84	0.9	0.88	1.40	1.23	3.67	3.31	3.45	2.84	6.26	4.20	9.89	6.30	3.87	7.76	6.19
MgO	0.00	0.39	0.64	0.00	0.47	0.5	0.54	0.07	0.60	0.31	0.49	0.97	0.57	0.69	0.65	0.36	0.72	1.36	0.30	0.75
CaO	19.56	4.47	1.32	1.81	4.80	11.5	7.70	3.36	7.12	7.39	7.28	6.39	7.76	9.28	4.68	0.65	3.52	4.92	4.18	2.97
K <sub>2</sub> O	0.57	0.85	0.79	2.28	3.41	2.0	3.00	1.12	0.63	0.90	0.17	1.04	1.92	0.19	0.11	3.88	0.81	0.44	2.51	3.56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.94	0.70	0.73	0.65	0.86	0.9	0.60	0.00	0.94	0.00	1.07	1.06	0.77	0.90	0.80	0.54	1.06	0.68	0.80	1.08
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.13	0	0	0.00	0.00	0.37	0.25	0.00	0.14	0.00	0.92	0.00	0.15	0
T	100.2	98.22	91.98	92.67	98.30	95.8	95.92	93.63	94.58	93.33	93.62	94.03	94.77	93.53	92.70	94.04	95.39	93.50	94.46	94.70
Nb (ppm)	6802	2635	3198	302	589	4730	5548	1986	690	3885	4196	6617	1828	4196	3397	3498	1828	3631	2281	2577
Ta	361	111	145	59	97	178	294	110	45	206	226	391	93	240	287	279	103	235	114	116
Zr	15220	9586	8124	10229	12028	7530	7291	8075	8983	9987	19583	9878	15871	8518	9347	8282	17336	8777	15126	21172
Hf	298	190	164	260	335	140	150	192	208	226	499	195	410	176	187	171	478	183	386	528
Th	2062	1154	1075	98	545	849	981	1223	1306	1306	547	1382	365	1207	1278	997	777	983	511	543
U	243	87	107	14	29	117	138	87	114	121	103	154	41	125	148	99	59	88	63	61
V	3560	1145	1710	506	1025	2083	1578	1905	2733	1998	1456	2696	884	2112	2352	1493	1337	1592	972	1396
La	6518	3363	3205	322	519	4247	3832	3908	4960	4205	1937	6998	1411	3396	4447	2600	1224	3259	1696	1874
Ce	13811	7196	6794	675	1261	9144	8327	8474	10593	8765	3997	14442	2945	7097	9275	5813	2713	6548	2800	3993
Pr	1264	781	605	0	141	679	662	548	760	820	436	1318	336	816	953	542	351	661	336	400
Nd	6290	3141	2643	526	881	3566	3201	3207	4168	3686	2094	6315	1269	3248	4133	2251	1238	2692	1445	1564
Pb	362	176	173	48	109	331	202	233	792	211	122	281	102	188	208	227	166	151	130	130
V	0	0	2346	0	0	2896	0	2536	2711	2637	28	3508	0	2592	3069	0	0	26	0	0
Cr	0	0	724	0	0	1176	624	788	1130	1041	0	1698	0	792	1052	739	221	712	303	395
Cu	0	0	0	34	26	0	44	10	0	0	0	0	11	0	20	39	74	0	176	23
Zn	130	104	111	64	43	209	262	134	267	67	8	290	47	103	98	256	55	93	333	159
Ga	29	22	24	21	37	20	0	25	22	20	33	23	29	12	19	31	34	23	37	35
Rb	25	54	55	101	134	106	195	101	34	36	8	35	128	3	8	164	38	8	111	336
Sr	385	132	206	23	34	121	134	103	163	202	397	256	185	237	258	98	315	253	247	162
Ba	0	0	294	33	0	687	803	781	676	0	0	54	0	0	0	53	191	0	203	305
Sn	338	238	201	85	130	292	332	313	343	286	218	302	118	243	281	270	170	178	150	174

Ni <sup>2+</sup> - tunus	JUL-18- L218	JUL-18- L221	JUL-18- L221	JUL-18- L227	JUL-18- L24	JUL-18- L25	JUL-18- L28	JUL-18- L29	JUL-18- L34	JUL-18- L39	JUL-18- L40	JUL-18- L41	JUL-18- L42	JUL-18- L44.3	JUL-18- L45	JUL-18- L46	JUL-18- L50	JUL-18- L60	JUL-18- L63
SiO <sub>2</sub> (p-%)	73.9	81.5	82.4	77.1	78.7	79.2	78.4	80.8	76.9	80.9	81.1	77.7	82.2	78.3	78.2	77.4	79.0	69.2	81.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.47	0.32	0.38	0.29	0.28	0.26	0.24	0.23	0.21	0.17	0.17	0.14	0.11	0.28	0.26	0.28	0.15	0.34	0.11
FeO <sub>tot</sub>	4.65	4.98	4.75	4.60	3.29	3.53	3.23	2.56	3.25	2.93	2.91	2.59	2.16	4.69	5.14	5.43	2.50	4.22	2.74
MgO	6.28	2.52	1.57	5.27	7.86	4.39	7.15	4.27	6.74	5.08	3.69	1.80	2.06	3.42	6.46	3.79	1.82	3.32	3.26
CaO	0.45	0.34	0.07	1.63	0.79	0.26	0.93	0.00	0.18	0.28	1.06	1.21	0.21	0.19	0.37	0.67	0.36	0.48	0.72
K <sub>2</sub> O	4.38	3.03	3.54	2.70	8.80	5.53	3.66	4.83	5.46	4.66	2.68	3.42	3.01	5.15	3.44	3.38	6.88	13.54	2.53
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.81	1.41	1.49	1.35	0.11	1.50	0.14	0.18	0.09	0.24	0.16	1.42	0.53	0.15	1.46	1.94	0.49	0.07	0.10
S	1.02	0.48	0.37	0.72	0.95	0.57	0.00	0.58	0.83	0.74	0.82	0.74	0.64	0.94	0.67	1.00	0.69	0.96	0.68
Tot	0.00	0.17	0.00	0	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00
Nb (ppm)	93.91	94.70	94.61	93.64	100.85	95.21	93.75	93.47	93.71	95.02	92.56	90.03	90.95	93.09	96.05	94.22	91.85	92.14	91.09
Ta	2410	1929	2838	1042	991	12147	1373	12613	2963	1293	437	3297	14186	1409	3693	2292	4688	4731	1593
Zr	106	128	164	85	155	520	160	522	225	69	26	182	477	94	200	108	278	303	93
Hf	20453	6829	5097	9400	7576	6599	9659	6796	10227	9575	8807	6099	5708	16070	11266	12682	6457	9562	6909
Ti	505	182	137	197	178	134	206	152	219	187	190	142	112	421	267	312	123	196	165
Th	573	437	441	1383	1354	929	1724	1024	1398	1401	1188	565	1127	387	975	807	887	1544	991
U	64	122	128	133	130	96	136	124	126	86	85	75	238	66	54	78	130	138	53
V	1281	1306	1023	1652	2855	1641	2240	1790	2083	1447	1633	1373	2221	1017	1490	1480	1790	2498	998
La	1826	1802	1826	4199	3306	2763	4352	3019	4360	4289	4098	2398	4117	1509	2263	2081	4409	4789	3070
Ce	3946	3755	3913	9119	7030	5525	9144	5923	9289	9073	8585	5193	7650	3096	4624	4483	9532	10061	6312
Pr	444	304	343	1025	759	462	829	471	978	1107	716	536	673	485	465	314	960	1049	701
Nd	1590	1495	1123	4178	3038	2519	3808	2656	4048	3929	3535	2214	3314	1354	1793	1675	4235	4581	2742
Pb	131	154	158	206	188	134	149	153	201	182	163	109	226	92	149	193	199	232	129
V	0	0	0	2386	0	0	0	0	0	0	0	3815	0	0	0	19	0	0	0
Cr	376	192	421	922	0	0	0	0	0	0	0	1553	0	174	473	0	0	0	0
Cu	24	24	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0	0	0	0
Zn	499	90	46	50	66	37	137	42	93	55	50	290	181	52	126	169	414	37	34
Ga	45	33	31	22	23	25	24	22	23	30	19	11	17	30	41	32	15	17	12
Rb	189	59	63	72	9	70	23	22	10	36	7	33	37	3	95	57	13	18	23
Sr	217	277	263	238	202	210	269	150	196	243	172	145	91	125	426	510	153	199	94
Ba	234	630	890	92	56	259	120	41	0	0	270	0	0	0	113	612	0	0	0
Sn	157	192	185	156	213	249	250	243	258	232	201	130	352	101	262	237	203	249	157



Ni <sup>2+</sup> - tunus	JUL-18- L69	JUL-18- L74	JUL-18- L8	JUL-18- L85 (1)	JUL-18- L85 (2)	JUL-18- L91	JUL-18- L96	JUL-18- L99	JUL- 2018- L102	KAK A-18- L15	KAK A-18- L17	KAK A-18- L18	KAK A-18- L19	KAK A-18- L20	KAK A-18- L4	KAK A-18- L5	LER- 18-L1	LER- 18-L2	LER- 18-L3	LER- 18-L4
SiO <sub>2</sub> (p-%)	72.5	82.7	76.4	82.1	80.0	57.1	80.5	77.3	76.7	76.4	76.6	77.7	72.2	74.0	77.5	80.0	71.5	82.5	74.0	77.6
TO <sub>2</sub>	0.43	0.12	0.17	0.15	0.17	0.23	0.27	0.24	0.15	0.36	0.30	0.30	0.37	0.45	0.23	0.23	0.10	0.14	0.39	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.33	2.42	2.59	2.78	2.94	11.50	3.60	4.92	5.16	5.59	5.03	4.80	4.47	5.53	5.56	4.14	5.31	2.90	5.09	3.95
FeO <sub>tot</sub>	4.23	4.08	6.20	0.92	1.00	6.20	2.39	7.74	2.33	4.36	4.20	1.86	5.93	6.09	2.81	4.13	4.30	1.82	3.24	5.71
MgO	1.09	0.32	0.22	0.37	0.42	0.26	0.55	1.05	0.67	0.55	0.64	0.95	2.54	0.40	0.55	0.57	0.43	0.30	0.77	1.25
CaO	4.43	1.02	6.88	4.38	5.80	6.54	1.59	1.69	4.07	1.46	1.63	0.93	3.23	0.29	3.72	4.07	7.32	2.68	6.94	3.03
K <sub>2</sub> O	4.21	0.08	0.05	1.80	1.93	0.36	2.87	1.80	3.03	2.02	0.31	3.09	2.00	3.40	2.96	1.20	3.16	1.54	2.99	3.28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.00	0.68	0.87	0.57	0.64	1.13	0.63	0.66	0.84	0.92	1.04	1.32	1.14	0.91	0.76	0.54	0.83	0.65	0.92	0.66
S	0.00	0.59	0.00	0.00	0.51	0.92	2.28	0.00	0.80	0.21	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	0.00	0.00	0.00
Tot	93.27	91.96	93.34	93.10	93.46	84.19	94.64	95.39	93.79	91.90	89.73	90.96	91.84	91.02	94.14	94.85	94.13	92.54	94.33	95.70
Nb (ppm)	2313	4944	2809	6333	5368	7247	3785	1133	6075	1757	1664	1427	2334	2394	5279	5497	6742	8667	5498	1408
Ta	139	265	131	292	281	389	217	179	313	119	116	88	111	132	323	314	309	365	311	52
Zr	17068	5826	9980	4037	4210	10832	10528	5002	12038	17285	14443	14588	18602	17749	9175	9044	9412	6820	10931	10701
Hf	452	124	199	82	81	233	237	141	270	466	401	348	489	451	208	184	216	137	228	258
Th	419	757	1627	713	703	1592	1122	973	1214	517	444	266	491	636	990	910	1349	758	1410	94
U	45	129	57	120	99	286	116	71	151	88	44	38	52	21	223	166	174	196	166	35
V	1215	1730	2318	1506	1350	3946	2199	1538	2081	996	982	1010	1751	473	1938	2445	2654	1804	2517	508
La	1578	3066	3987	2702	2223	8329	3573	3632	4914	1759	1535	1743	1741	578	3090	2764	6107	4421	4380	1338
Ce	3272	6831	8398	5307	4722	17739	7619	5461	10283	3656	3342	3065	3391	1217	6462	5921	12914	8997	9328	2308
Pr	379	812	952	235	291	1769	667	454	942	322	354	378	395	231	633	437	1155	815	670	366
Nd	1246	2989	3829	2099	1555	8143	3083	1614	4790	1533	1454	1398	1575	689	2759	2368	5394	3587	3561	858
Pb	138	177	191	150	137	328	192	134	230	112	109	50	84	41	226	179	276	228	382	132
V	0	0	0	0	0	0	0	1149	2293	0	1186	0	0	0	2058	0	2988	2592	28	706
Cr	0	0	0	0	0	0	0	510	1071	386	618	0	0	0	914	0	1707	870	1342	317
Cu	0	59	0	0	0	25	0	27	28	58	0	0	0	15	0	0	16	0	0	0
Zn	134	64	103	145	1892	211	117	55	104	47	149	104	490	97	75	40	137	519	359	257
Ga	20	16	25	0	8	40	23	35	20	24	28	14	33	29	28	25	25	13	18	28
Rb	273	0	6	169	176	17	96	68	82	63	9	118	58	217	151	55	75	41	134	400
Sr	149	75	123	131	132	309	145	36	220	174	184	218	605	49	194	204	378	144	313	47
Ba	418	0	0	1578	1218	0	209	565	0	243	0	344	186	289	120	0	128	0	328	0
Sn	140	203	278	254	223	383	270	129	308	122	162	110	186	161	212	221	336	261	262	132

## Kannettavan XRF-spektrometrin mittaustulokset, Tyyppi 2

Näytteenus	II-18- L159	II-18- L171	II-18- L174	II-18- L168	II-18- L53	KAK A-18- L38	II-18- L162	II-18- L164	II-18- L215	II-18- L105	II-18- L170, 1 (1)	II-18- L211	KAK A-18- L3	II-18- L161	II-18- L214	II-18- L217	II-18- L93	II-18- L154	II-18- L170, 1 (2)
SiO <sub>2</sub> (p.-%)	46.1	60.0	72.0	73.9	68.1	69.8	70.2	72.0	70.4	50.3		74.2	74.8	72.4	69.1	71.1	74.4	50.4	67.1
TiO <sub>2</sub>	0.5	1.0	0.25	0.18	0.24	0.58	0.2	0.19	0.27	0.1	0.16	0.39	0.20	0.37	0.90	0.16	0.20	0.5	0.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.5	6.0	10.24	10.35	11.23	10.24	10.7	10.83	9.48	12.2		6.89	8.78	9.43	7.92	9.36	8.11	11.1	8.96
FeO <sub>tot</sub>	12.5	28.4	5.68	4.59	5.90	4.65	5.7	4.85	7.82	1.6	6.47	6.20	6.04	7.22	5.57	6.41	5.00	12.1	6.80
MgO	0.7	0.5	0.75	0.26	0.78	0.68	0.7	0.57	0.30	1.4		0.47	0.38	0.42	0.48	0.47	0.54	2.7	1.69
CaO	12.5	0.1	1.22	1.13	3.36	2.85	1.9	2.01	2.41	26.7	3.33	2.46	1.17	2.57	3.20	4.15	0.67	18.0	6.61
K <sub>2</sub> O	3.8	0.2	4.49	4.31	5.68	8.52	6.0	5.22	4.83	7.0	6.34	3.45	5.30	6.80	6.36	5.10	6.38	5.7	5.39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.7	0.6	0.17	0.00	0.23	0.00	0.0	0.10	0.70	0.3		0.84	0.12	0.00	1.06	0.28	0.28	1.5	0.00
S	0.1	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.0	0.00
Tot.	92.3	96.9	94.80	97.67	95.50	97.35	55.7	95.72	96.24	99.5	16.33	94.89	96.83	103.21	94.61	97.07	95.71	101.9	104.81
Nb (ppm)	814	1911	365	646	1065	366	542	641	843	206	996	480	208	488	445	894	908	716	900
Ta	157	309	21	54	0	0	18	0	32	69	90	72	0	0	100	54	0	81	134
Zr	11547	10951	1738	4913	2037	2742	2812	1803	4005	4936	7541	10262	2336	3315	17780	3377	5145	19790	8041
Hf	350	1382	39	161	58	67	84	35	113	120	193	312	64	90	574	95	128	621	191
Th	2816	1067	669	201	202	344	41	98	282	166	545	876	294	524	131	267	134	706	1316
U	44	276	35	27	31	8	12	10	16	5	23	22	11	14	4	24	17	18	30
Y	1343	888	203	322	346	326	166	267	354	320	730	1358	150	232	629	441	479	1886	790
La	18673	0	223	460	352	360	431	752	736	976	923	340	245	595	478	1051	660	3655	1233
Ce	33497	276	430	1114	607	790	760	1272	1207	1790	2085	956	427	1186	866	2063	1314	6592	2714
Pr	2828	224	196	236	168	173	163	201	146	274	282	170	205	263	0	332	213	555	322
Nd	12505	67	0	517	363	295	270	333	272	720	1056	705	0	640	576	764	607	2388	1429
Pb	297	161	69	57	23	42	22	44	98	98	132	105	80	56	69	65	62	132	220
V	19	520	0	0	0	5	0	0	0	1107	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	40	23	0	0	0	0	0	0	197	290	0	0	0	0	0	0	0	144	0
Cu	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0
Zn	142	1390	153	97	35	98	150	137	200	52	209	52	140	270	47	174	313	190	150
Ga	107	107	80	73	69	69	69	65	65	62	62	62	62	61	61	60	60	59	59
Rb	228	17	359	322	478	770	498	422	703	584	641	413	452	601	862	554	583	350	506
Sr	429	3	41	38	44	37	68	55	44	360	118	32	15	39	38	79	42	159	174
Ba	184	41	121	46	75	118	118	85	36	631	170	32	0	76	0	117	116	306	148
Sn	253	182	92	98	86	102	106	88	134	110	100	136	86	107	125	108	140	177	130

Nagyecumunus	JU-18- L170	JU-18- L225	JU-18- L216	KAK A-18- L35	JU-18- L185	JU-18- L32	JU-18- L139	JU-18- L228 (1)	JU-18- L222	JU-18- L93.2	JU-18- L109	JU-18- L228 (2)	JU-18- L169	JU-18- L93.4	JU-18- L52	JU-18- L101	JU-18- L177	JU-18- L223	JU-18- L117	KAK A-18- L10
	2																			
SiO <sub>2</sub> (p-%)	71.5	72.7	72.2	69.7	72.1	56.9	71.4	69.6	72.9	71.9	72.8	73.3	67.1	71.4	74.8	74.9	66.5	71.7	74.4	76.2
TiO <sub>2</sub>	0.29	0.22	0.09	0.41	0.62	1.32	0.14	0.11	0.22	0.23	0.24	0.22	0.5	0.25	0.28	0.22	0.33	0.25	0.23	0.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.63	8.88	9.11	8.53	6.38	14.29	10.51	10.59	9.63	9.55	9.65	7.53	8.0	9.90	7.57	8.47	7.40	8.45	8.64	8.06
FeO <sub>tot</sub>	6.03	4.18	6.69	6.95	6.39	2.03	3.46	1.50	4.24	5.27	2.43	4.64	8.3	3.60	0.71	1.26	8.80	6.53	3.09	2.42
MgO	1.06	0.43	0.44	0.86	0.62	1.46	0.57	0.53	0.46	0.67	0.21	0.41	2.0	0.79	0.53	0.66	1.66	0.64	0.46	0.00
CaO	2.49	5.04	2.50	2.04	2.93	5.74	2.29	4.12	4.60	0.87	3.65	6.39	2.9	3.61	7.13	5.14	5.33	2.76	4.21	0.08
K <sub>2</sub> O	5.89	4.60	4.99	5.42	3.92	5.03	3.37	9.37	4.73	7.02	6.08	3.83	4.4	5.85	5.16	5.76	4.29	6.54	5.72	4.32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.65	0.42	0.85	1.16	2.59	0.25	0.60	0.32	0.26	0.30	0.38	1.4	0.31	0.55	0.27	0.24	0.20	0.29	0.16
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.00	0.0	0.19	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
Tot	98.89	96.75	96.48	94.71	94.12	89.40	91.97	96.44	97.05	95.94	95.48	96.68	94.6	95.89	96.68	96.79	94.59	97.11	97.01	91.33
Nb (ppm)	1086	770	813	303	679	1253	283	699	857	688	751	589	355	802	1025	766	647	501	544	616
Ta	74	47	111	0	58	41	53	57	61	24	37	52	45	27	56	36	18	56	19	44
Zr	3100	6017	5847	21479	18874	45568	1857	8190	4252	5017	4854	3574	16598	5499	10605	3981	3315	2362	3920	2897
Hf	75	200	179	701	600	1596	71	232	133	141	129	97	531	144	252	113	116	64	106	91
Th	351	145	114	263	202	2603	343	26	101	155	135	93	942	154	381	114	124	136	135	53
U	30	11	17	3	11	190	10	16	14	16	16	11	10	19	29	22	16	13	11	21
Y	294	419	570	1010	485	1312	140	677	493	380	374	346	879	386	717	331	427	291	333	80
La	357	812	555	829	158	100	264		787	741	711	666	3023	772	1285	672	775	349	600	265
Ce	793	1722	1379	1601	362	303	606	278	1478	1432	1374	1245	3546	1429	2299	1312	1418	690	1217	558
Pr	252	326	365	212	276	0	181	235	103	90	198	261	314	258	144	221	263	208	278	61
Nd	242	553	719	684	213	591	142	252	634	616	574	565	933	676	1004	422	691	191	570	243
Pb	121	82	75	91	30	406	48	42	29	103	62	49	253	83	96	66	38	31	49	10
V	0	12	0	0	0	51	0	0	0	0	0	0	946	0	27	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	658	0	0	0	0	0	0	0
Cu	0	0	0	0	24	124	0	0	0	0	0	0	27	19	0	0	0	0	13	0
Zn	133	79	112	128	41	118	44	30	139	315	194	39	227	149	47	103	171	164	47	30
Ga	59	59	59	57	56	55	55	55	54	53	53	53	52	52	52	52	51	51	50	50
Rb	591	488	613	637	514	95	193	721	394	385	457	288	500	482	200	359	386	556	464	146
Sr	73	84	59	53	57	156	33	15	48	62	76	70	56	89	151	87	63	21	51	0
Ba	105	73	0	46	0	777	94	0	75	209	130	25	191	216	168	129	76	24	100	62
Sn	112	113	110	140	137	85	76	106	99	115	100	112	138	125	141	118	126	100	106	67

Nayctunus	JU-18- L122	JU-18- L207	JU-18- L21	JU-18- L196	JU-18- L155	JU-18- L166	JU-18- L121	JU-18- L165	JU-18- L153	JU-18- L11	JU-18- L116 (1)	KAK A-18- L11	JU-18- L145	JU-18- L149	JU-18- L112	JU-18- L130	JU-18- L44	JU-18- L7	JAM- 18- L17	JAM- 18- L34
SiO <sub>2</sub> (p-%)	73.7	68.5	72.5	73.2	73.6	73.2	72.4	73.0	53.1	72.0	76.8	68.5	70.3	70.1	72.6	73.0	71.0	72.4	75.2	75.2
TiO <sub>2</sub>	0.2	0.58	0.49	0.90	0.18	0.54	0.19	0.5	0.40	0.22	0.19	0.21	0.16	0.34	0.26	0.19	0.4	0.58	0.27	0.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.8	7.65	5.79	5.32	8.45	6.95	9.16	6.3	8.07	8.67	8.37	8.77	13.42	11.19	8.27	5.69	9.1	7.30	9.08	8.07
FeO <sub>tot</sub>	3.5	7.78	7.41	5.52	3.78	7.82	3.51	6.2	9.62	1.59	2.29	9.16	3.23	4.13	2.03	6.24	4.4	4.11	3.57	1.14
MgO	0.5	0.53	0.23	1.45	0.64	1.05	0.61	0.4	0.91	0.66	0.39	0.00	0.00	0.82	0.80	0.53	0.7	1.01	0.48	0.35
CaO	3.5	3.31	2.76	2.99	8.06	2.24	3.66	4.0	16.57	6.01	1.18	0.40	6.73	4.73	6.88	4.13	6.0	1.01	1.96	4.47
K <sub>2</sub> O	5.0	4.04	4.34	5.93	1.99	4.86	5.54	4.1	5.41	4.05	4.90	5.81	0.91	4.30	5.87	4.64	0.6	4.37	4.57	5.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1	1.35	1.00	1.27	0.36	0.88	0.31	0.9	1.68	0.32	0.00	0.07	0.25	0.20	0.34	0.57	0.6	0.63	0.26	0.43
S	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.00	0.3	0.24	0.12	0.00
Tot.	98.8	93.73	94.51	96.59	97.02	97.54	95.41	95.6	95.75	93.68	94.13	92.90	95.05	95.78	97.43	94.99	93.0	64.56	95.45	95.01
Nb (ppm)	490	3127	2746	652	596	383	631	373	593	550	641	176	1424	466	1159	684	926	1402	666	1238
Ta	15	170	172	80	19	0	33	19	34	0	26	0	60	49	0	90	41	63		35
Zr	3693	28293	24336	12528	3487	17114	3905	16103	15334	4391	4679	852	1441	1584	6505	10363	5890	10912	4867	5874
Hf	109	723	618	403	133	505	108	503	454	116	136	13	25	26	161	348	164	309	127	164
Th	100	854	924	306	102	31	105	200	349	121	123	22	1039	365	166	242	181	337	137	157
U	9	61	5	20	13	5	15	9	16	14	12	9	38	6	24	11	19	39	17	25
Y	254	1823	1392	820	289	1177	269	980	2114	320	260	63	334	258	452	830	527	616	368	503
La	593	2582	2117	968	573	229	572	348	1160	573	391	413	688	409	838	518	758	689	628	882
Ce	1064	5300	4587	1353	1094	530	1047	715	2257	1122	776	700	1238	854	1628	1152	1592	1478	1205	1676
Pr	87	489	556	143	252	196	143	90	327	240	143	150	191	212	0	245	245	184	117	242
Nd	390	2246	2066	587	541	733	517	442	966	486	331	355	200	445	631	824	638	606	549	614
Pb	47	206	179	89	28	32	46	43	62	58	45	2	41	43	84	55	79	271	65	67
V	0	0	0	1721	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	465	436	1280	0	0	0	0	195	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0
Cu	0	27	19	0	0	0	0	0	46	6	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0
Zn	69	208	688	65	51	117	94	55	10	100	33	215	33	99	144	37	92	544	259	105
Ga	50	49	49	49	49	47	47	47	46	45	44	43	43	43	43	43	43	42	41	41
Rb	374	236	280	574	140	490	374	374	389	292	315	331	20	157	377	208	13	203	381	184
Sr	92	320	302	87	99	44	64	39	53	98	47	2	126	198	144	18	210	31	83	150
Ba	130	681	119	87	34	105	78	45	204	100	43	40	389	350	279	51	52	323	319	169
Sn	103	177	242	128	96	191	90	137	172	98	88	78	111	94	128	115	100	144	103	105



Nayctunus	JU-18- L126	JU-18- L116 (2)	JU-18- L208	JU-18- L93.3	JU-18- L103	JU-18- L224	JU-18- L141	KAK A-18- L24	JU-18- L212	JU-18- L206	JU-18- L150	JU-18- L70	JU-18- L184	JU-18- L220	JU-18- L20	JU-18- L175	KAK A-18- L21	JU-18- L151	KAK A-18- L30	KAK A-18- L12
SiO <sub>2</sub> (p-%)	68.6	77.0	72.7	75.6	79.1	69.7	71.5	61.1	74.7	75.2	70.6	70.5	76.9	74.5	76.0	71.6	75.1	70.0	77.2	67.8
TiO <sub>2</sub>	0.34	0.20	0.55	0.21	0.20	0.57	0.37	0.50	0.47	0.38	0.51	0.21	0.13	0.21	0.24	0.37	0.26	0.31	0.30	0.96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.12	8.62	5.40	7.55	6.73	12.85	7.80	7.94	6.21	9.67	11.84	7.80	7.91	10.71	5.16	6.56	9.30	8.42	5.62	8.46
FeO <sub>tot</sub>	6.03	2.46	5.73	2.86	1.00	4.05	7.24	7.10	1.56	2.48	3.50	4.55	3.44	2.37	5.01	5.03	2.20	3.69	4.33	10.86
MgO	1.64	0.17	0.58	0.60	0.18	1.07	0.60	1.22	0.61	0.70	1.09	0.98	0.45	0.71	0.69	0.58	0.68	1.01	0.54	0.97
CaO	5.52	3.40	7.18	4.63	5.66	2.07	3.79	5.14	5.53	4.05	4.14	2.49	0.49	0.90	3.76	5.52	5.40	5.22	1.77	0.86
K <sub>2</sub> O	3.22	4.77	4.48	5.03	4.27	5.79	5.01	2.38	5.06	1.98	3.79	4.34	5.63	5.26	0.58	5.95	1.46	6.06	1.63	4.43
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.00	1.11	0.25	0.26	0.25	0.33	2.44	0.98	0.15	0.32	0.42	0.23	0.10	0.93	0.65	0.25	0.41	1.09	0.27
S	0.00	0.00	0.00	0.01	0.12	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.68	0.00
Tot.	95.56	98.61	97.74	96.75	97.48	96.32	96.61	87.85	95.25	94.64	95.85	91.29	95.15	94.74	92.36	96.31	94.8	95.15	99.16	94.58
Nb (ppm)	183	639	3080	694	491	142	587	3471	2674	247	244	492	601	112	2089	133	279	679	1723	235
Ta	0	24	171	21	14	31	54	136	140	37	31	31	52	35	119	35	0	39	88	0
Zr	524	4606	26553	5288	4849	417	5716	35981	18519	673	700	2391	4033	674	17470	11152	637	3616	15394	708
Hf	0	131	703	125	124	0	143	669	431	16	0	72	106	0	446	330	0	124	403	0
Th	50	144	730	131	132	37	142	803	510	291	446	81	102	51	501	241	1169	42	566	9
U	3	11	73	17	12	6	14	70	66	9	7	9	26	4	51	6	10	41	57	8
Y	374	293	1993	364	300	137	353	2985	1349	266	177	268	267	51	1301	239	207	248	1271	91
La	385	413	3163	707	647	304	582	2024	1765	224	528	602	607	255	1739	165	842	619	1141	322
Ce	888	827	5841	1380	1271	537	1202	4422	3712	392	928	866	1228	405	3606	423	1396	1251	2423	624
Pr	133	131	403	100	273	0	131	212	336	108	115	133	144	120	427	122	204	226	267	88
Nd	429	227	2236	490	434	171	545	1738	1651	0	153	210	340	264	1528	182	507	490	1117	322
Pb	23	49	189	79	67	31	37	181	136	20	52	34	45	10	84	45	52	31	91	0
V	0	0	0	0	7	27	0	0	0	0	11	0	20	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	367	0	0	0	0	0	387	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cu	0	0	25	48	0	0	0	31	0	21	20	0	0	0	0	0	11	18	14	0
Zn	77	43	148	132	157	98	58	241	614	16	77	54	231	18	0	21	76	65	41	279
Ga	40	40	39	39	39	38	38	37	37	34	34	34	33	33	33	33	33	32	32	32
Rb	102	319	207	417	247	406	175	64	188	44	147	415	315	140	29	424	29	245	37	270
Sr	320	54	348	84	93	116	252	523	115	86	188	73	89	37	487	19	110	94	88	0
Ba	529	105	709	184	167	521	462	655	213	209	336	58	1066	252	156	52	144	154	110	97
Sn	112	96	178	86	115	74	118	148	228	84	83	84	92	75	184	123	81	106	120	91

Nayietunus	KAK A-18- L26	JU-18- L129	KAK A-18- L7	JU-18- L133	JU-18- L202	JU-18- L187. 2	JU-18- L229	JU-18- L219	JU-18- L58	JU-18- L134	JU-18- L200	JU-18- L55	JU-18- L87	JU-18- L187. 1	JU-18- L147
SiO <sub>2</sub> (p-%)	75.9	57.9	72.8	60.1	71.0	71.5	64.3	77.4	71.8	68.6	73.7	75.4	77.8	78.9	75.2
TiO <sub>2</sub>	0.23	1.59	0.29	1.8	1.0	0.50	0.22	0.44	0.5	0.54	0.38	0.33	0.36	0.33	0.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.88	13.81	8.36	15.0	5.5	8.12	9.90	5.84	10.1	12.44	8.06	6.62	5.10	6.10	8.5
FeO <sub>tot</sub>	1.58	0.88	3.87	0.8	7.5	9.76	2.93	2.88	4.1	1.26	2.75	3.26	5.02	2.50	3.3
MgO	0.46	1.26	0.52	1.4	2.0	0.95	1.43	0.66	1.0	0.77	0.85	0.89	0.55	0.51	0.3
CaO	3.57	6.14	2.00	7.2	3.8	2.62	2.74	0.30	3.2	3.49	7.84	3.20	3.43	6.56	4.7
K <sub>2</sub> O	2.93	4.82	4.80	4.9	1.3	4.20	7.02	4.57	2.3	4.75	2.74	0.24	1.68	2.56	4.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	2.35	0.37	1.0	0.6	0.15	0.46	0.97	0.5	1.42	0.38	0.91	0.88	0.31	0.2
S	0.00	0.00	0.00	0.0	0.1	0.20	0.00	0.00	0.1	0.00	0.33	0.31	0.07	0.00	0.1
Tot	95.69	88.79	92.98	100.7	92.8	97.98	89.04	93.11	37.9	93.26	96.99	91.14	94.98	97.79	96.5
Nb (ppm)	838	1351	610	1087	1522	332	342	2197	832	2954	579	1861	1668	461	842
Ta	0	62	73	35	90	41	25	124	45	33	21	133	91	19	50
Zr	61.5	33692	3295	17137	8601	2433	6053	20109	7584	23575	5844	15832	15044	5189	432
Hf	0	1124	73	487	218	33	212	496	203	997	153	389	413	139	0
Th	335	1665	369	879	47	55	93	474	227	1519	147	253	505	132	52
U	18	210	9	98	39	10	6	78	26	297	15	55	51	23	37
Y	183	1116	297	707	132	180	219	1498	496	1421	361	1037	1134	287	190
La	425	136	735	52	252	355	458	2013	710	131	653	1727	1661	523	435
Ce	770	201	1346	174	529	672	956	4201	1592	523	1286	3438	3429	1121	799
Pr	103	0	137	96	0	114	88	402	167	114	283	358	400	0	74
Nd	148	0	651	186	205	255	332	1523	561	330	555	1510	1511	188	194
Pb	23	397	20	177	29	18	35	87	51	248	38	68	92	32	30
V	0	47	0	37	36	0	0	0	0	39	0	0	0	0	0
Cr	0	0	123	0	159	0	0	426	0	0	0	0	0	0	0
Cu	61	102	0	0	11	12	0	0	7	0	10	19	0	0	12
Zn	11	24	90	55	123	162	68	363	46	36	32	20	57	45	38
Ga	32	31	31	31	31	30	30	29	28	28	28	28	28	27	23
Rb	60	96	191	102	46	222	267	174	43	96	73	0	35	87	174
Sr	77	95	31	118	67	88	95	224	211	125	315	211	170	132	39
Ba	249	328	191	364	133	996	299	453	470	439	462	105	364	792	183
Sn	76	78	90	85	147	94	102	148	95	80	102	150	129	92	89

## Kannettavan XRF-spektrometrin mittaustulokset. Tyypit 3-5.

Näytetunnus	KAKA-18-L9	KAKA-18-L8	JJ-18-L197	JJ-18-L135	JJ-18-L143	JJ-18-L163	JJ-18-L226	JJ-18-L3	JJ-18-L213
Tyyppi	3	3	4	4	4	4	4	5	5
SiO <sub>2</sub> (p.-%)	71.2	70.7	59.1	53.6	58.1	18.1	38.6	58.7	54.7
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.21	0.23	0.2	0.29	2.3	0.3	0.43	0.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.98	8.39	9.76	11.4	9.55	1.9	2.0	10.73	3.47
FeO <sub>tot</sub>	2.78	3.40	5.19	7.9	7.76	28.6	24.1	9.22	8.97
MgO	0.00	0.12	2.22	1.9	3.97	3.7	8.1	0.00	3.25
CaO	0.10	0.10	4.68	5.0	3.09	4.2	5.9	12.76	26.37
K <sub>2</sub> O	3.57	3.24	3.95	6.3	7.73	0.8	1.7	0.96	1.33
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5.44	1.32	4.65	1.4	0.83	6.7	0.3	0.94	0.37
S	0.00	0.00	0.41	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.27
Tot. (p.-%)	85.29	87.45	90.15	87.8	91.34	66.5	56.8	93.68	99.42
Nb (ppm)	1226	431	817	1140	1220	7344	279	1571	563
Ta	90	62	58	0	66	120		65	0
Zr	30797	9089	4434	7153	6509	97899	11409	10925	778
Hf	1066	466	72	90	122	3047	164	315	0
Th	248	73	7545	6952	9168	126357	167048	1134	270
U	57	20	89	116	116	649	2623	46	19
Y	408	100	1427	1247	1083	2184	3420	2365	1477
La	968	421	12460	1644	1425	2907	868	1821	1268
Ce	1957	723	17668	2532	2203	6571	3033	4540	2073
Pr	370	227	1342	358	292	440	720	601	304
Nd	992	548	3804	624	498	2644	1777	2587	962
Pb	29	21	1378	261	342	8547	6636	152	48
V	959	1790	4480	0.0	0	5	0.0		0
Cr	484	1463	119	0.0	104	435	0.0		307
Co	0		0	39.5	67	44	123	155	0
Ni	10		67	70.5	98	43	23	119	87
Sc	0		0	0.0	0	413	1025		0
Cu	205	89	0	0.0	0	51	268		74
Zn	42	147	382	100	103	1007	289	171	220
Ga	37	34	58	57	44	0	0	44	12
Rb	140	152	360	513	633	34	145	23	116
Sr	4	64	133	31.5	32	124	82	168	117
Ba	0	71	32	0.0	0	1591	0		168
Mo	98	73	0	0.0	0	206	0	11	153
Sn	103	66	142	96.5	95	116	124	126	118

## Liite 2. Lohkareiden fysikaaliset ominaisuudet.

Näytetunnus	Tyyppi	Lohkare koko (cm)	Cps/kg	Max. säteily kentällä (cps)	Magneettisuus (10 <sup>-3</sup> SI)	Magneettisuus mediaani (10 <sup>-3</sup> SI)	Tiheys (g/cm <sup>3</sup> )
JAM-18-L30	1	40x25x20	400	600	19.40-30.30	27.5	
JII-18-L102	1	50x30x30	1867	12000	0.1-0.2	0.14	
JII-18-L104	1	50x30x30	1762	7800	0.3-0.4	0.34	
JII-18-L106	1	25x15x10	2009	5500	1.0-1.6	1.04	
JII-18-L110	1	30x20x15	2273	5085	0.2-0.5	0.5	
JII-18-L111	1	70x40x30	2266	17144	0.7-0.8	0.75	
JII-18-L113	1	50x40x25	1455	7400	45.5-53.5	49.1	2.84
JII-18-L114	1	100x60x30	2006	11700	27.0-34.9	31.6	2.89
JII-18-L118	1	40x30x20	1493	11000	1.7-2.7	1.84	
JII-18-L12	1	30x30x15	2073	6000	1.30-1.55	1.46	
JII-18-L120	1	65x40x30	1205	10600	0.2-0.3	0.24	
JII-18-L123	1	30x20x15	1209	5800	0.18-0.36	0.26	
JII-18-L124	1	30x20x15	936	2900	4.70-7.43	6.46	2.85
JII-18-L128	1	60x50x30	1107	8600	0.84-2.86	1.37	
JII-18-L137	1	30x25x15	1793	7700	0.18-0.2	0.2	
JII-18-L138	1	40x30x20	2444	10299	1.5-2.5	1.68	
JII-18-L14	1		2204		1.03-2.14	1.16	
JII-18-L144	1	40x30x20	1381	7100	0.3-0.4	0.37	2.97
JII-18-L146	1	40x30x20	644	3800	11.4-16.2	14.2	
JII-18-L148	1	25x15x15	2264	4900	10.4-13.7	12.6	
JII-18-L15	1		1898		0.16-0.32	0.24	
JII-18-L16	1		1992		4.01-4.81	4.1	
JII-18-L17	1		102		4.82-10.50	5.18	
JII-18-L173	1	55x30x15	2110	4000	6.5-12.8	10.6	
JII-18-L179	1	50x40x30	342	800	73.2-240	103	
JII-18-L180	1	40x30x30	878	1800	48.0-113	73.3	
JII-18-L181	1	25x15x15	1662	1800	0.5-0.7	0.07	
JII-18-L182	1	50x40x40	1564	3600	0.7-1.4	1.33	2.79
JII-18-L183	1	20x15x10	2204	1200	0.07-0.09	0.08	
JII-18-L186	1	25x20x10	2383	2300	0.07-0.09	0.08	
JII-18-L189	1	20x15x15	2043	1400	3.6-4.3	4.15	
JII-18-L19	1		866	3300	0.98-3.54	2.58	
JII-18-L190	1	60x50x30	1331	3200	0.3-0.5	0.33	
JII-18-L191	1	30x20x20	669	1400	0.3-0.4	0.34	
JII-18-L194	1	20x15x10	1338	1200	3.5-4.4	3.81	
JII-18-L195	1	30x20x10	1915	1500	2.8-3.1	2.81	
JII-18-L199	1	30x20x20	1605	2200	79.3-91.8	90.7	
JII-18-L201	1	25x25x10	962	2700	0.5-1.0	0.83	
JII-18-L204	1	30x15x5	1507	1000	0.3-0.6	0.52	
JII-18-L205	1	40x25x20	867	1200	0.8-1.6	0.97	
JII-18-L209	1	30x20x20	977	950	0.6-1.1	0.65	
JII-18-L210	1	20x20x15	1147	800	0.2-0.3	0.3	
JII-18-L218	1	65x35x10	840	1700	0.8-2.2	1.51	2.82
JII-18-L221	1	70x40x30	1375	2300	5.6-26.4	9.18	
JII-18-L227	1	25x20x10	1575	2000	3.5-4.5	3.75	2.81
JII-18-L24	1	50x40x30	1852	8800	27.30-30.70	28.1	
JII-18-L25	1	70x40x30	1868	10000	4.9-11.0	5.5	
JII-18-L28	1	30x25x15	1383		5.98-16.1	11	
JII-18-L29	1	30x25x15	2302		5.3-9.0	7	2.85
JII-18-L34	1	70x30x15	2049	9900	10.4-21.1	13.4	
JII-18-L39	1	70x30x15	1856		10.3-17.3	13.4	
JII-18-L40	1	20x20x20	2046		1.88-2.16	2.05	
JII-18-L41	1	20x15x15	1826		0.3-1.0	0.48	



Näytetunnus	Tyyppi	Lohkare koko (cm)	Cps/kg	Max. säteily kentällä (cps)	Magneettisuus (10 <sup>-3</sup> SI)	Magneettisuus mediaani (10 <sup>-3</sup> SI)	Tiheys (g/cm <sup>3</sup> )
JII-18-L42	1	30x20x20	2078		0.2-0.4	0.3	
JII-18-L45	1	40x30x15	1398		43.2-52.6	49.7	
JII-18-L46	1	30x15x10	1159		3.16-4.75	4	
JII-18-L50	1	30x15x15	1483		0.08-0.13	0.1	
JII-18-L60	1	30x30x15	1701	7200	0.07-0.31	0.11	
JII-18-L63	1	20x15x10	2046	1500	1.61-7.71	2.44	
JII-18-L69	1	20x20x10	797	3200	21.5-22.9	22	
JII-18-L74	1	30x20x20	1834	2500	0.5-0.77	0.56	
JII-18-L85	1	20x20x15	1245	1100	0.15-0.46	0.36	
JII-18-L91	1	25x20x15	3130	3800	0.43-2.17	0.58	
JII-18-L96	1	50x40x30	2118	13000	0.14-0.73	0.49	
KAKA-18-L15	1	5x15x15	1019	2100	2.3-5.05		
KAKA-18-L17	1	30x5x5	892	2000	32-47		
KAKA-18-L18	1	5x5x15	678	1700	0.11-0.15		
KAKA-18-L19	1	20x20x40	844		0.4-0.8		
KAKA-18-L20	1		645	1800	0.2-0.7		
KAKA-18-L4	1	40x20x20	2100	9500	0.4-1.5		2.72
KAKA-18-L5	1	?x?x?cm	1848	5500	3.7-9.3		
LER-18-L1	1	20x10x10	2592	1350	0.9-1.5	1.12	2.8
LER-18-L2	1	40x25x15	1829	1700	0.1-0.1	0.11	
LER-18-L3	1	20x20x10	2407	1700	0.3-0.6	0.53	
LER-18-L4	1	80x60x40	195	1300	79.1-166.0	150	
JAM-18-L17	2	80x50x30	176	1890	24.3-40.3	39	
JAM-18-L34	2	60x30x30	226	2466	0.8-1.9	1.22	
JII-18-L101	2	60x40x20	176	1900	0.7-1.0	0.91	
JII-18-L103	2	50x30x30	288	3000	1.9-2.7	2.14	
JII-18-L105	2	40x40x30	358	1700	8.5-10.8	9.11	
JII-18-L109	2	40x30x20	190	1750	13.1-16.9	14.6	
JII-18-L11	2	100x100x50	222	1800	9.02-18.00	14.3	
JII-18-L112	2	70x50x30	245	3100	7.4-8.9	8.46	
JII-18-L116	2	60x40x20	146	2000	38.3-43.3	41	
JII-18-L117	2	45x30x20	205	1600	30.5-42.2	37.4	
JII-18-L121	2	80x50x40	196	2500	51-58	57.3	
JII-18-L122	2	50x40x40	152	1700	57.4-71.6	67.9	
JII-18-L126	2	100x80x80	360	2500	0.20-0.28	0.24	
JII-18-L129	2	40x30x15	2559	9600	0.05-0.7	0.05	
JII-18-L130	2	70x40x30	220	2200	114-183	132	
JII-18-L132	2	70x40x30	2763	13200	0.3-0.5	0.4	
JII-18-L133	2	35x25x15	948	5600	0.01-0.02	0.01	
JII-18-L134	2	40x30x20	3005	8200	0.02-0.08	0.03	
JII-18-L139	2	40x35x25	442	2888	93.2-117.0	105	
JII-18-L141	2	60x40x30	191	2100	90.4-96.2	94.9	
JII-18-L145	2	20x20x15	4089	7100	14.6-36.5	32.6	
JII-18-L147	2	70x50x30	63	1750	13.6-32.6	24.6	
JII-18-L149	2		1606	12800	12.4-29.4	22	
JII-18-L150	2	60x30x15	3465	10900	0.2-34.0	0.22/34	
JII-18-L151	2	100x60x30	205	2700	6.7-8.8	7.1	
JII-18-L153	2	20x20x15	1465	6500	1.0-1.9	1.23	
JII-18-L154	2	30x30x20	728	5000	1.84-28.3	17.6	
JII-18-L155	2	100x100x60	149	2500	109.0-126.0	116	
JII-18-L157	2	40x20x10	789	2300	107-141	127	
JII-18-L159	2	60x40x30	922	7000	29.60-151.00	37.3	2.94
JII-18-L160	2	25x20x15	1157	4900	21-36	30	
JII-18-L161	2	40x30x30	552	1800	29-33	32	
JII-18-L162	2	70x50x50	68	1780	113-137	126	

Näytetunnus	Tyyppi	Lohkare koko (cm)	Cps/kg	Max. säteily kentällä (cps)	Magneettisuus (10 <sup>-3</sup> SI)	Magneettisuus mediaani (10 <sup>-3</sup> SI)	Tiheys (g/cm <sup>3</sup> )
JII-18-L164	2	100x70x70	175	2800	119-152	134	
JII-18-L165.1	2	100x70x30	586	10700	107-125	110	
JII-18-L165.2	2		586		102.0-114.0	106	
JII-18-L166	2	140x70x40	234	3600	103-135	111	
JII-18-L168	2	80x70x50	116	6380	104-111	108	
JII-18-L169.1	2	60x50x40	494	3300	66.2-133	83.7	
JII-18-L169.2	2	60x50x42	462	3300	80.6-103	88.2	2.7
JII-18-L170	2	170x100x70	847	9000	34.4-57.7	49.1	
JII-18-L171	2	25x20x15	1625	4300	46.4-92.7	80.8	
JII-18-L174	2	40x?x?	650	600	62.5-84.1	79	
JII-18-L175	2	50x40x40	320	1000	98.4-132	124	
JII-18-L176	2	40x30x?	874	1500	163.0-293	242	
JII-18-L177	2	60x40x30	249	780	135.0-150	140	
JII-18-L184	2		260	700	90.1-95.5	92	
JII-18-L185	2		325	800	67.9-104	96.6	
JII-18-L187.1	2	100x70x40	201	380	0.4-2.5	1.5	
JII-18-L187.2	2	100x70x41	61	380	72.3-101	99.3	
JII-18-L196	2	40x25x20	963	1300	69.7-81.7	79.2	
JII-18-L20	2		805	2100	18.20-24.20	21.3	
JII-18-L200	2	100x40x30	238	600	0.8-1.5	1.22	
JII-18-L202	2	50x30x30	386	800	0.2-0.3	0.25	
JII-18-L206	2	65x30x30	184	700	0.3-0.6	0.44	
JII-18-L207	2	40x20x15	1229	1700	5.6-9.7	6.44	2.78
JII-18-L208	2	40x20x20	862	1400	5.7-6.1	5.96	
JII-18-L21	2		712	4900	61.70-88.30	81.5	
JII-18-L211	2	40x20x20	546	1500	100.0-128	122	
JII-18-L212	2	45x30x20	860	1400	0.1-0.3	0.22	
JII-18-L214	2	50x30x30	223	500	101.0-108	105	
JII-18-L215	2	40x30x30	244	540	126.0-150	140	
JII-18-L216	2	170x80x80	192	640	45.1-52.0	49.5	
JII-18-L217	2	90x40x40	203	500	88.1-121	105	
JII-18-L219	2	40x30x10	724	1500	0.2-0.3	0.19	
JII-18-L220	2	30x30x20	93	440	9.1-12.5	11.3	
JII-18-L222	2	90x40x30	122	760	51.7-75.6	63.7	
JII-18-L223	2	35x30x30	139	480	56.6-89.1	62.4	
JII-18-L224	2	80x40x30	73	620	50.6-55.5	53.6	
JII-18-L225	2	100x70x30	103	700	102-125	123	
JII-18-L228	2	70x40x30	324	640	42.9-127	89.8	
JII-18-L229	2	70x50x30	367	2100	19.9-22.3	22.1	
JII-18-L44	2	70x50x40	430		0.23-0.30	0.25	
JII-18-L52	2	50x50x50	510		0.03-0.04	0.03	
JII-18-L53	2	40x30x0	338		40.3-70.6	45	
JII-18-L55	2	40x35x15	568		0.0-0.3	0.3	
JII-18-L58	2	60x50x15	98		0.2-0.2	1.83	
JII-18-L7	2	20x20x30	728		32.00-53.20	48.1	
JII-18-L70	2	30x30x30	218	1800	124-137	133	
JII-18-L87	2	50x40x15	818	1700	0.28-0.37	0.33	
JII-18-L93	2	60x40x30	177	600 (2300)	69.8-109	92.6	
KAKA-18-L1	2	70x70x40	287	2000-2500	30-53		
KAKA-18-L10	2	50x30x40	168		0.26-0.32	0.28	
KAKA-18-L11	2	40x30x30	81		0.5-1.7		
KAKA-18-L12	2	50x30x20	83		0.14-0.52		
KAKA-18-L21	2	30x30x40	825	2600	2.0-10.1		
KAKA-18-L24	2	40x15x10	1944	4500	1-44	12	
KAKA-18-L26	2	30x15x15	179	2000	2.7-4.0		

Näytetunnus	Tyyppi	Lohkare koko (cm)	Cps/kg	Max. säteily kentällä (cps)	Magneettisuus (10 <sup>-3</sup> SI)	Magneettisuus mediaani (10 <sup>-3</sup> SI)	Tiheys (g/cm <sup>3</sup> )
KAKA-18-L3	2	7x7x100	300	2000-2500	23-44		
KAKA-18-L30	2	60x35x20	970	7200	0.20-0.26	0.21	
KAKA-18-L35	2		340		90.80-107.00	105	
KAKA-18-L38	2		277		48.10-66.80	48.8	
KAKA-18-L7	2	30x30x20	200	2140	2.7-3.8	3.29	
JPTA-2016-L1/1	3	35x24x25 +33x24x25		2300 (1), 2400 (2)			
JPTA-2016-L2	3	35x26x24		2800	0.2-0.6		
KAKA-18-L16	3	40x30x30	316	2000	1.5-4.0		
KAKA-18-L6	3	40x70x7	90	3400	0.12-0.22	0.22	
KAKA-18-L8	3	10x20x40	1061	2000	0.15-0.33		
KAKA-18-L9	3	10x20x20	1618	2000	0.07-0.11		
KAKA-16-L6/LX900	3	44x23x19	837	900			
JII-18-L135	4	20x15x10	12392	32450	54.5-71.6	70	
JII-18-L143	4	17x12x8	20279	32832	75.0-106.0	83.8	2.88
JII-18-L163	4	7x4x3	91361	23300	0.1-0.3	0.24	4.06
JII-18-L197	4		8861	13000	22.7-28.2	27.4	2.92
JII-18-L226	4	5x5x5	32843	6400	0.1-0.2	0.14	
JII-18-L213	5	70x40x30	351	2500	10.5-108	95.2	3.06
JII-18-L3	5	35x30x20	1276	4800-5000	0.3-1.3	1.28	

## Liite 3. Kentältä kerätyt tiedot lohkareista

Näyte tunnus	Tyyppi	X KKG3	Y KKG3	Kuvaus	Syvyys	Muoto	Rapauuma/ Murtopinnan väri	Rae koko	Maas- tossa jäljellä (%)
JU-18-L106	1	3503035	7112062	2 lohkaretta n. 2m etäisyydellä toisistaan					20
JU-18-L113	1	3498349	7113132	Pumaruskea, allaniittimaista kiiltoa?					95
JU-18-L114	1	3498661	7114202	parin cm pegmat suomi KK lohkarissa					98
JU-18-L118	1	3502851	7111952	Outo, vaaleahko harmaa.					95
JU-18-L12	1	3502414	7112889	Heikosti raitainen, tumma, hienorakeinen, massiivinen	Pimassa	Kulmikas	Ruosteinen/ Mustanharmaa	Hieno	
JU-18-L124	1	3498665	7114813	Pumaruskea, pienirakeinen. Serisiittyntynyt.					60
JU-18-L128	1	3503762	7113280	Ruskehtava, allaniittiraitainen? Ei kaivettu esiin kokonaan					95
JU-18-L14	1	3503097	7111750	Tyypillinen					
JU-18-L144	1	3501677	7116188	Pienirakeinen, tummanharmaa-ruskehtava jossa mustaa kiiltävää mineraalia raitoina.					80
JU-18-L146	1	3502621	7114584	Tummanharmaa, ruskehtava					90
JU-18-L148	1	3500130	7113877	Graniittisuonia. Lohkare puron pohjalla.					50
JU-18-L15	1	3503096	7111761	Tyypillinen. Vähän pyriittiä.					
JU-18-L16	1	3503101	7111818	Tyypillinen. Vähän pyriittiä. Samanlainen kuin L15.					
JU-18-L17	1	3503111	7111821	Tyypillinen. Vähän pyriittiä. Samanlainen kuin L16.					
JU-18-L179	1	3502916	7114186	Raitainen, tumma-ruskeanharmaa, pienirakeinen. Magnetiittipitoinen.					
JU-18-L181	1	3502907	7113003	Kuin JU-18-L179					
JU-18-L182	1	3502887	7113010	Karbonaatti-fluoriittijuonia-breksiaa (mm paksuja). Muuten tavallinen Katajakangas-tyylinen juoni.					
JU-18-L189	1	3502266	7113583	Erittäin tiivisrakeinen					
JU-18-L191	1	3498937	7114822	Outo. Pienirakeinen					
JU-18-L218	1	3496634	7115853						
JU-18-L227	1	3503190	7113439						0
JU-18-L24	1	3498648	7114095	Tyypillinen					
JU-18-L25	1	3498659	7114164	Massamainen, hienorakeinen. Paksu gr juoni jossa amfibolia sen kontaktissa REE juoneen.					
JU-18-L28	1	3498660	7114124	Graniittisuonitusta, muuten tavallinen. Graniittinen aines on suuntautunut.				Hieno	
JU-18-L29	1	3498663	7114156	Tummaa hienorakeinen gneissiluskeinen kivi jossa tummemman mineraalin juovaista raitaisuutta. Lisäksi parin cm graniittisia juonia liuskeisuuden tasossa.				Hieno	
JU-18-L34	1	3498665	7114182	Tyypillinen					
JU-18-L39	1	3498649	7114153	Ruskehtava, muuten KK-tyyppinen? Kohtalaisen magneettinen Katajakangas-lohkareeksi			Vaaleapuner- tava/ Mustanharmaa	Pieni	
JU-18-L40	1	3498650	7114170	Vähän omutisennäköinen. Kts analyysi. Kaivettu esiin vain osa. Mustanharmaa Katajakangas-tyypin lohkar			Ruosteinen/ Mustanharmaa	Hieno- pieni	
JU-18-L41	1	3502397	7112759						10
JU-18-L42	1	3502236	7112740	Katajakangas tyyppinen, mustanharmaa					70
JU-18-L45	1	3503924	7113167	Näyttää tyyppiseltä Katajakangas-lohkareelta mutta oudon magneettinen. Vahva sumtaus			Vaaleanharmaa / Mustanharmaa		70
JU-18-L46	1	3503944	7113263	Vähän kiisua. Vanhan soramontun penkassa					30
JU-18-L50	1	3501916	7113924	Tyypillinen					70



Näyte tunnus	Tyyppi	X KKJ3	Y KKJ3	Kuvaus	Syvyys	Muoto	Rapauma/ Murtopinnan väri	Rae koko	Maas- tossa jäljellä (%)
JU-18-L60	1	3502311	7112338	Allaniittiraitainen? Tummanruskea, pienirakeinen, muistuttaa L159 lohkaista. Erittäin mielenkiintoinen. K2O köyhä.					80
JU-18-L63	1	3503062	7111806	Ruskehtava, tumma, pienirakeinen. KK-tyyppiä analyysin perusteella.					60
JU-18-L69	1	3505587	7109613	Tummanharmaa. Pitoisuudet Kontioahon tasoa.					60
JU-18-L8	1	3499324	7112877	Heikosti raitainen, tumma, hienorakeinen, massiivinen					
JU-18-L85	1	3502805	7113069	Tummanharmaa, pienirakeinen, raitainen.					70
JU-18-L8	1	3499324	7112877	Heikosti raitainen, tumma, hienorakeinen, massiivinen					
JU-18-L91	1	3503052	7111992	Erikoinen kiilto murtopinnalla. Allaniittistä aiheutuva?					20
KAKA-18-L15	1	3497052	7113999	Pinnasta 1000 cps, kun kaivoi 5-10cm 2100 cps, lähde 5 cm x 15 x 15 cm raitainen alk gr, näyte L15.1. Näyttää vahvasti hiertyneeltä alkalimaasäpäräniitiltä.		Vähän pyörästynyt			Ei
KAKA-18-L17	1	3497022	7114015	1500 kuntan päältä, 2000 kivistä joka laattamainen alkgr 30x5x5cm, kulkikas. Voimakkaan magneettinen mikä epätyypillistä Katajakangas-tyypin lohkeille.		Vähän pyörästynyt			Ei
KAKA-18-L18	1	3496485	7115952	Pieni 5x5x15cm kulkikasa, kuntan alta 1000 cps, kivistä 1700 cps. kivi hiertynyt raitainen myloniitti, hienorakeinen. pienirak, näyte I18.1. Kemialtaan "Katajakangas" tyyppiä?	Kuntanalla	Vähän pyörästynyt	Punaharmaa/ Voimakkaan punaruskea	Hieno	Ei
KAKA-18-L19	1	3496430	7115921	1500 cps kuntan päältä, kaivoi niin tuli 2 kpl laattamaisia lohkeita 20x20x40 ja 5x5x20cm, otettu näyte I19.1 joka säteilee 2000 cps, raitainen-tumma punertava ja hienorakeinen, lohkeiden rakopinnoilla pegmat juomia		Vähän pyörästynyt	Punaharmaa-ruskea/ mustanharmaa-punertava	Hieno	
KAKA-18-L20	1	3496445	7116015	Kuntan päältä 1000 cps, 20 cm syvyydessä täysin teräviksi sepelin kappaleiksi hajonnut lohkeita, kaivettu kasaan josta 1800 cps max, hiertynyt punaharmaa, hienorakeinen, näyte I20.1, loput jätetty maastoon	20 cm kuntanalla	Kulkikas	Punaharmaa/ Tummanharmaa-punaisia juovia	Hieno	Kyllä
KAKA-18-L4	1	3501715	7114716	Katajakangas-tyypin lohkeita, musta kv rikas murtopinta, rapaumapinta on poikkeuksellisen vaalea, ruskehtava (sekottaa ei-mineralisointumeisiin kvmpgneisseihin), monitumma jäi vielä kaivettavaa. Näyte L4.1 Huom toinen lohkeita tästä paikasta 5 m etelään.	5 cm kuntaa	Kulkikas	Punaharmaa/ Mustaharmaa	Hieno	Kyllä
KAKA-18-L5	1	3501730	7114715	Katajakangas-tyypin lohkeita, säteily max 5500 cps, otettu näyte L5.1. Samanlainen/kokoinen kuin KAKA-2018-L4	5 cm kuntaa	Kulkikas	Punaharmaa/ Mustaharmaa	Hieno	Kyllä
IER-18-L1	1	3502379	7112833						0
JAM-18-L34	2	3501708	7114184	Tummanharmaa-ruskehtava, outo					95
JU-18-L101	2	3504436	7110639	Täplikkäs, vaaleanharmaa.					90
JU-18-L103	2	3504405	7110578	Vaaleanharmaa, "täplikkäs", pienirakeinen, vain vähän tummia mineraaleja. Kts analyysi					80
JU-18-L105	2	3504161	7110421	Punertavanruskea, pienirakeinen, voimakkaasti syöpyneitä karbonaatti? Juonia? Jotkin parin cm leveitä.					90
JU-18-L109	2	3501668	7114251	Vaaleahko-harmaa, kv-silmäkkeinen					80
JU-18-L11	2	3502407	7112949	Kvartsihajarakeinen, heikosti raitainen, homogeeninen tekstuuri. Heikko Nb-Zr-REE pitoisuus. Ahumia paljon, eikä vastaa koostumukseltaan suoraan Katajakangas-tyypin lohkeita. Oudon Ca-rikas (6.01% CaO), onko fluoriittia?			Valkoisenharmaa/harmaa	Hienopieni	
JU-18-L112	2	3502958	7112009	Vaaleahko-harmaa, kv-silmäkkeinen					95
JU-18-L116	2	3502927	7111820	Punaruskea, pienirakeinen. L93 tyyppiä?					95
JU-18-L117	2	3502854	7111951	Matalat pitoisuudet					
				Punaruskea, kv-silmäkkeinen L93 tyyppiä? Matalat pitoisuudet					98

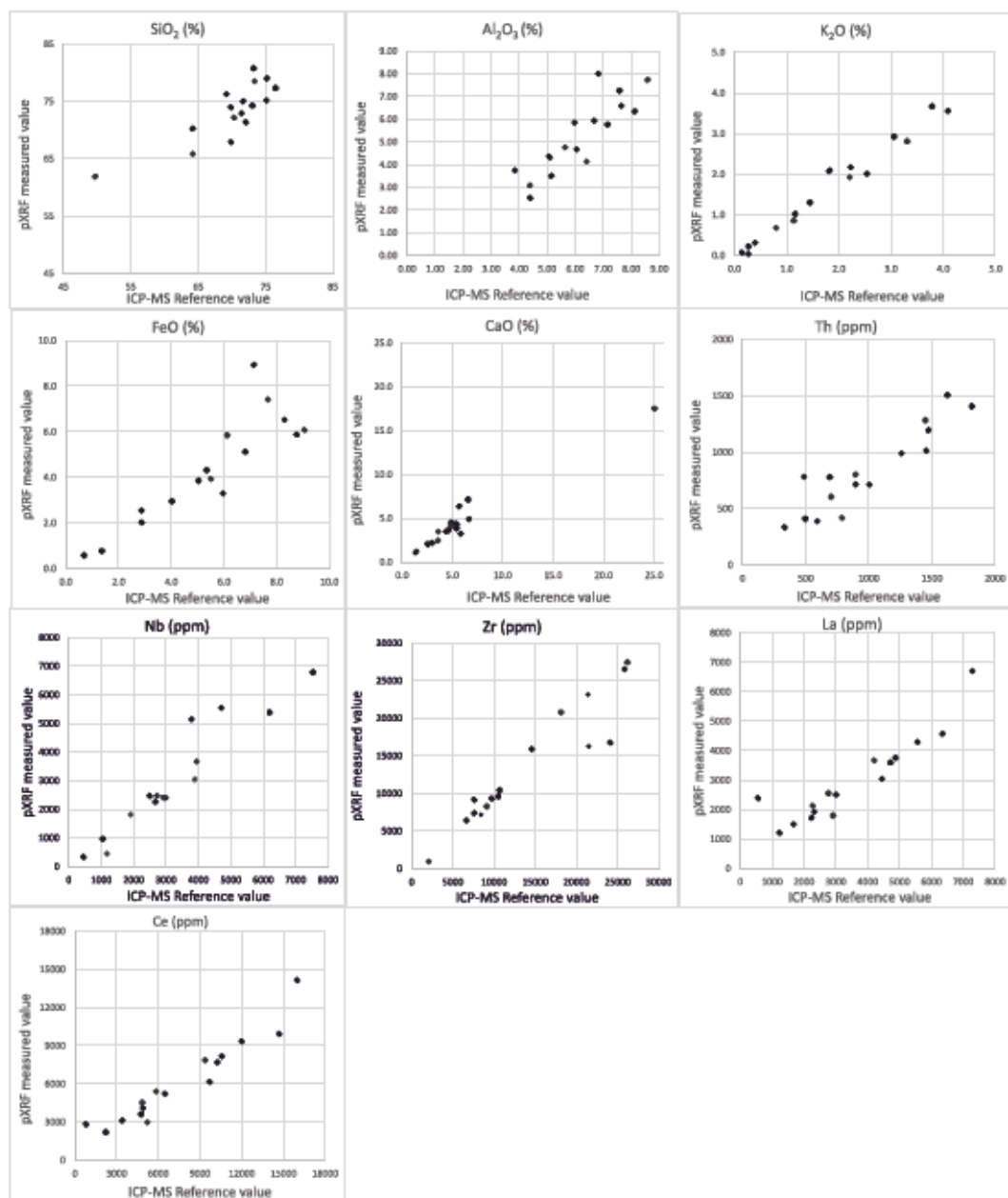
Näyte tunnus	Tyyppi	X KKJ3	Y KKJ3	Kuvaus	Syvyys	Muoto	Rapauma/ Murtopinnan väri	Rae koko	Maas- tossa jäljellä (%)
JII-18- L121	2	3502878	7111998	Sama kuin L122. L93-tyyppi					98
JII-18- L122	2	3502872	7111958	Punaruskea, pienirakeinen. Kv- silmäkkeinen. L93-tyyppi					95
JII-18- L126	2	3496760	7114603	Pyrokseeni/amfibolirikas. Kivessä kohta, jossa säteily 4500 cps					99
JII-18- L129	2	3503623	7113338	Vaaleanruskehtava					60
JII-18- L130	2	3503607	7113361	Ruskehtava mgt pirotteinen.					98
JII-18- L132	2	3503575	7113355	Punaruskea, pienirakeinen					95
JII-18- L133	2	3503576	7113357	Vaaleanharmaa, raitainen, Zr-rikas					
JII-18- L134	2	3503575	7113358	Vaaleanharmaa, raitainen, Zr-rikas					80
JII-18- L139	2	3502992	7112672	Raitainen, punaruskea, vahvasti suuntautunut					80
JII-18- L141	2	3503006	7112675	Tummanharmaa, pienirakeinen					80
JII-18- L145	2	3496796	7115642	Punaruskea, vihertävää mineraalia? epidootti?					0
JII-18- L149	2	3502948	7114438	Ruskehtava-harmaa					95
JII-18- L150	2	3502946	7114436	Pumertavaharmaa, pienirakeinen, raitainen					80
JII-18- L151	2	3502925	7114258	punaruskea-harmaa - vihertävä - fluoriitti					99
JII-18- L153	2	3502849	7114283	Samanlainen kuin JII-18-L154					0
JII-18- L154	2	3502846	7114288	Ruskehtava harmaa, jossa raitoja ja paakkuja mustaa mineraalia. Säteily vaihtelee eri osissa lohkaretta 3500-6100 cps välillä					0
JII-18- L155	2	3502836	7114322	Vaalea-ruskehtavanharmaa, pienirakeinen, fluor-juonia					99
JII-18- L157	2	3502844	7114220	Vaalea-ruskehtavanharmaa, pienirakeinen, magneittipitoinen					50
JII-18- L159	2	3502910	7114330	Analyyysi kokokivistä. Ruskehtavaharmaa kivi jossa runsaasti mustaa mineraalia, raitainen ja pienirakeinen.					90
JII-18- L160	2	3502588	7114346	Vaaleanharmaa, raitainen, pienirakeinen. Kvartsijuonia lsk-tasossa.					0
JII-18- L161	2	3502619	7114372	Hyvösenkankaan graniittia. Luultavasti pyrokseenipitoinen.					80
JII-18- L162	2	3502944	7114075	Kontioahomainen, mutta pitoisuudet puuttuu					99
JII-18- L164	2	3502749	7114336	Vaaleanharmaa, raitainen					99
JII-18- L165.1	2	3502816	7114546	Kontioahomainen. Laattamainen					99
JII-18- L165.2	2	3502816	7114546	Allaniittiraitoja ja silmäkkeitä?					
JII-18- L166	2	3502825	7114538	Kontioahomainen					99
JII-18- L168	2	3502709	7114372	Pienirakeinen, vaaleanpunertava					95
JII-18- L169.1	2	3503975	7112890	Vähän kuin JII-18-165.2, magneittipiroitteinen, todennäköisesti allaniittia juovina (tarkasta XRF), vahva lineaatio ja linskeisuus					95
JII-18- L169.2	2	3503975	7112890	Vähän kuin JII-18-165.2, magneittipiroitteinen, todennäköisesti allaniittia juovina (tarkasta XRF), vahva lineaatio ja linskeisuus					95
JII-18- L174	2	3503756	7113088	Punaruskea. ei kaiv. esiin					
JII-18- L175	2	3503559	7113177	Pienirakeinen, punaruskea. ei kaiv. kokonaan esiin					
JII-18- L176	2	3501599	7116304	Pumertava-ruskea, paikoin fluoriittijuovainen. Pieni-keskirakeinen. ei kaiv. kokonaan esiin					
JII-18- L177	2	3503004	7114098	Ruskehtava-harmaa. Kalsiittijuonia.					
JII-18- L184	2	3502883	7113024	Tumma, harmaa, ruskehtava. Pienirakeinen.					
JII-18- L187.1	2	3503019	7112767	Fluoriittijuoni					

Näyte tunnus	Tyyppi	X KKJ3	Y KKJ3	Kuvaus	Syvyys	Muoto	Rapauma/ Murtopinnan väri	Rae koko	Maas- tossa jäljellä (%)
JU-18- L187.2	2	3503019	7112767	Magnetiittipiroitteinen, kiisupiroite					
JU-18- L20	2	3498516	7113168	Pumaruskea, tositumma ja hienorakeinen, raitainen. Vahvan suuntautunut, myloniitti? Selvistä maasälpäpitoineen joten ei KK-tyyppejä. Jotain mustaa 20-30%. Muutamia breksioivia juonia.					
JU-18- L21	2	3498713	7113336	Ruskehtava-vihertävä, tumma, pienirakeinen, homogeeninen.					
JU-18- L207	2	3496619	7115865						
JU-18- L44	2	3499061	7114526	Pienirakeinen, vahvasti raitainen, tumma ja ruskehtava. Albainen K2O.			Vaaleanharmaa / Vihertävä vaalea ruskea	Keski	95
JU-18- L52	2	3501915	7113908	Vaaleanruskehtava-harmaa. Hiuksenohuita fluoriittjuonia, pääosin kvartsia ja K-maasälpää.					95
JU-18- L53	2	3502107	7114042	Pienirakeinen gneissi jossa fluoriittia piroitteena? Jokin rapautunut pois kuopalle. Voimakkaan magneettinen. Nb-Zr-REE pitoisuudet alhaiset.			Vaaleanpunertava-punertavaruskea / Vaaleanruskehtava	Pieni	90
JU-18- L55	2	3502919	7114632	Tumma vihertäväruskea, raitainen pienirakeinen gneissi. Eri väristä raitaa. Mielenkiintoinen kts analyysi. Nb-Zr-REE ja Th-U pitoisuudet Kontioahon tasoa, mutta tämä on Nb-rikkaampi.			Tumma / Vaaleanharmaa -vihertävä	Pieni	80
JU-18- L58	2	3502893	7114588	Mineralisoitunut Pienirakeinen harmaa gr osue. Näytteessä kolmea erilaista koostumusta 1) harmaa hienorak gr, 2) pienirak msp juovainen gr 3) amfibolijuoni?				Pieni	70
JU-18-L7	2	3500293	7112976	Pienirakeinen, harmaa, heikosti jotain tummaa mineraalia raitana. Magnetiittipiroitteinen, kohtalaisen magneettinen.		Vähän pyöristynyt	Punaharmaa / Mustanharmaa-ruskehtava	Hieno	
JU-18- L70	2	3503471	7113601	Nb-Zr-REE pitoisuudet vaatimattomia. Tummanruskea, pienirakeinen.					70
JU-18- L87	2	3502858	7114630	Tummanharmaa, raitainen, pienirakeinen. Nb-Zr-REE Pitoisuudet Kontioahon tasolla					80
JU-18- L93	2	3502987	7112108	Tummanharmaa, pienirakeinen, raitainen. JU-L116 samaa tyyppiä?					
KAKA- 18-L1	2	3501954	7115550	Otettu näytteet L1.2 ja L1.2. Säteilystä 1000 cps. Näkyvää fluoriittirantua ja magnetiittia. Hyvösenkankaan alkalimaasälpägraniittia.	Kuntan alla (5-10 cm)	Kulmikas	Ruskehtava / Punaharmaa, vihertävä	Hieno-pieni	Kyllä
KAKA- 18-L10	2	3498089	7120420	50x30x40cm amfi rait alkgr, ei selvää min merkkiä, säteily?, näyte?					
KAKA- 18-L11	2	3498009	7120522	Näyte I11.1, max cps 930, 40x30x30cm, 500 cps näytteestä					
KAKA- 18-L12	2	3498016	7120499	Näyte L12.1, alkalimaasälpägraniitti jossa n. 700-1000cps max, hyvin homogeeninen säteily kauttaaltaan. 59x30x20 cm					
KAKA- 18-L21	2	3496641	7116274	Iso kivi, kuntan päältä 1600 cps, alta 2600 cps, näyttää hiertyneeltä alkgr?, otettu pieni näyte I21.1, loppulohkare vaatii kangen, merkitty teipillä, koko 30x30x40cm vähän pyöristynyt kulmistaan, otettu isompi näyte noin neljännes jätetty maastoon. Ympäristössä matala taustasäteily. Huom! kaksi näytettä 21.1 ja 21.2	10 cm kuntanalla	Vähän pyöristynyt	Vaaleanpunertava / Pumaruskea	Pieni-keski	Kyllä
KAKA- 18-L24	2	3496938	7114451	Pinnasta 3000, lohkarista 4500 cps, 40x15x10cm, n 15 cm kuntan alla, puolet lohkarista jätetty maastoon, valokuva	15 cm kuntanalla	Vähän pyöristynyt / kulmikas	Vaaleanruskea / Mustanharmaa-punertavia juovia	Hieno	Kyllä
KAKA- 18-L26	2	3496683	7116248	Gneissirakeiteinen graniittinen kivi. Väritään punertava-pumaruskea. Sahatulla pinnalla jotain mineraalia rapautunut pois/kuopalle, kivi täynnä gneissiraitaisuutta seuraavia luokosia. Korkeimmat REE, Nb, Zr pitoisuudet tulevat epäsuunnollisesti kivessä esiintyvistä raidoista.	Kuntan alla 5-10 cm	Vähän pyöristynyt	Vaaleanpunertava / Punertava, punaruskea	Pieni-keskirak	

Näyte tunnus	Tyyppi	X KKG3	Y KKG3	Kuvaus	Syvyys	Muoto	Rapauuma/ Murtopinnan väri	Rae koko	Maas- tossa jäljellä (%)
KAKA-18-L3	2	3502021	7115478	Koko jäi selvittämättä, kulkikas ainakin 100 cm pitkä. Säteily lohkarista 2000-2500 cps, näytteestä 650 cps. Näytteet L3.1 ja L3.2 Hyvösenkankaan alkalimaasälpägraniittia.	Kuntan alla (5-10 cm)	Kulkikas	Vaaleanpunerta va/ Vaalearuskea- vihertävä	Hieno- pieni	Kyllä
KAKA-18-L30	2	3502932	7114540	Lähiympäristössä muita samanlaisia (Joukon löytämät)	(10 cm) Kuntan alla				60%
KAKA-18-L35	2	3503681	7113266	2830 cps, kvartsimspgn magn pitoinen, 50x40x20, näyte L35.1, 5 cm paksu kv juomi lsk tasossa jossa fl yhteydessä, tosi kontioahomainen					
KAKA-18-L38	2	3503675	7113247	Iso kivi punalla, vyöhykkeellinen max säteily 3700 cps, näyte 38.1 kvmspgn					
KAKA-18-L7	2	3497782	7120767	30x30x20cm, max säit 2140, L7.1 näytteestä 850 cps. Hiertynyt alkalimaasälpägraniitti-myloniitti					
JPTA-2016-L1/1	3	3498109	7120399	Paljon AMP sisältävä. Ruskeita kohtia, viireitä ja mustia myös. Muutama lohkarie vierekkäin. Vaalea mineraalia jonka kohdalla korkeita säteilyarvoja. Taustasäteily 180 cps.	Maanpin nan alla: syv: 5 cm	Särmikäs	Punertava	Keski	Ei
JPTA-2016-L2	3	3498090	7120414	Korkeimmassa säteilykohdassa tuntematonta vaaleaa ja vihreää mineraalia. Voimakkaasti säteilevä lohkarie. Löydetty harjanteen laelta 10 m iestä.	Maanpin nan alla: syv: 5 cm	Vähän pyöristynyt	Tummapunainen	Keski	Ei
KAKA-18-L16	3	3497024	7114089	Kevyesti särmistään pyöristynyt granitoidigneissi, kunnan päältä 1500 cps kivistä 2000 cps, koko 40x30x30cm. Näyte L16.1, lohkarie jätetty maastoon		Vähän pyöristynyt			Kyllä
KAKA-18-L6	3	3498027	7120532	Alkalimaasälpägraniittilohkarie, isokokoinen, vasara hajosi eikä saanut kunnan näytettä. Otettu näyte L6.1. Tutkittava lisää.	Kuntan alla (5-10 cm)	Kulkikas	Vaalea- punertava/Vihe rtäväpunarusk ea	Keski- karkea	Kyllä
KAKA-18-L8	3	3498091	7120430	Säteily pimasta 2000 cps, lohkarieen koko 10x20x40cm, heti JPTA-L2 lohkarieen vierestä, näyttää samanlaiselta, löydetty kunnan alla 5-10 cm, otettu näyte L8.1, loput jätetty maastoon					
KAKA-18-L9	3	3498081	7120437	Pieni lohkarie 10x20x20cm, oli kunnan ja moreenin alla 10-15cm, pintaosaan tuli 1000 cps, n. 2000 cps kun vähän kaivoi. Selvästi Mustikkakangas tyyppin Zr-juomia sisältävä lohkarie. Oli osin männyn juurien välissä, hajosi kun irroitti. Koko lohkarie kerätty pois	Männynj uuren/ku ntan alla	Kulkikas	Punaruskea/Pu naruskea	Hieno- karkea	Ei
KAKA-16-L6	3	3498142	7120339	Säteily n. 10 x tausta. Säteilymaksimi ruskeiden gn-liusk., tasossa esiintyvien raitojen kohdalla.	Maanpin nan alla: syv: 5 cm	Särmikäs	Vihertäväpunai nen	Keski	Kyllä
JII-18-L135	4	3503565	7113186	Samanlainen kuin JII-18-L143					0
JII-18-L143	4	3502386	7114823	Pienirakeinen kvartsimaaälpägn jossa voimakkaan punaruskeita Th-rikkaita raitoja/juomia					0
JII-18-L163	4	3502911	7114200	Thoriummalmi? Ruosteinen, rapautunut.					0
JII-18-L197	4	3504014	7112775						
JII-18-L213	5	3503888	7113032						
JII-18-L3	5	3499353	7114152	Pienirakeinen, vihertävänharmaa, raitainen, pyrokseeni ja fluoriittipitoinen. Hie teetetty. Metsäautotien kääntöpaikalta betipinnasta. Maata muokattu	Pimassa	Vähän pyöristynyt	Punaharmaa/Vi hertävänmasta	Pienirak einen	Ei



**Liite 4. Kannettavan XRF-spektrometrin mittaustulosten vertailu Bureau Veritaksen geolaboratoriossa tehtyihin ICP-OES/-MS kokokivianalyyseihin.**

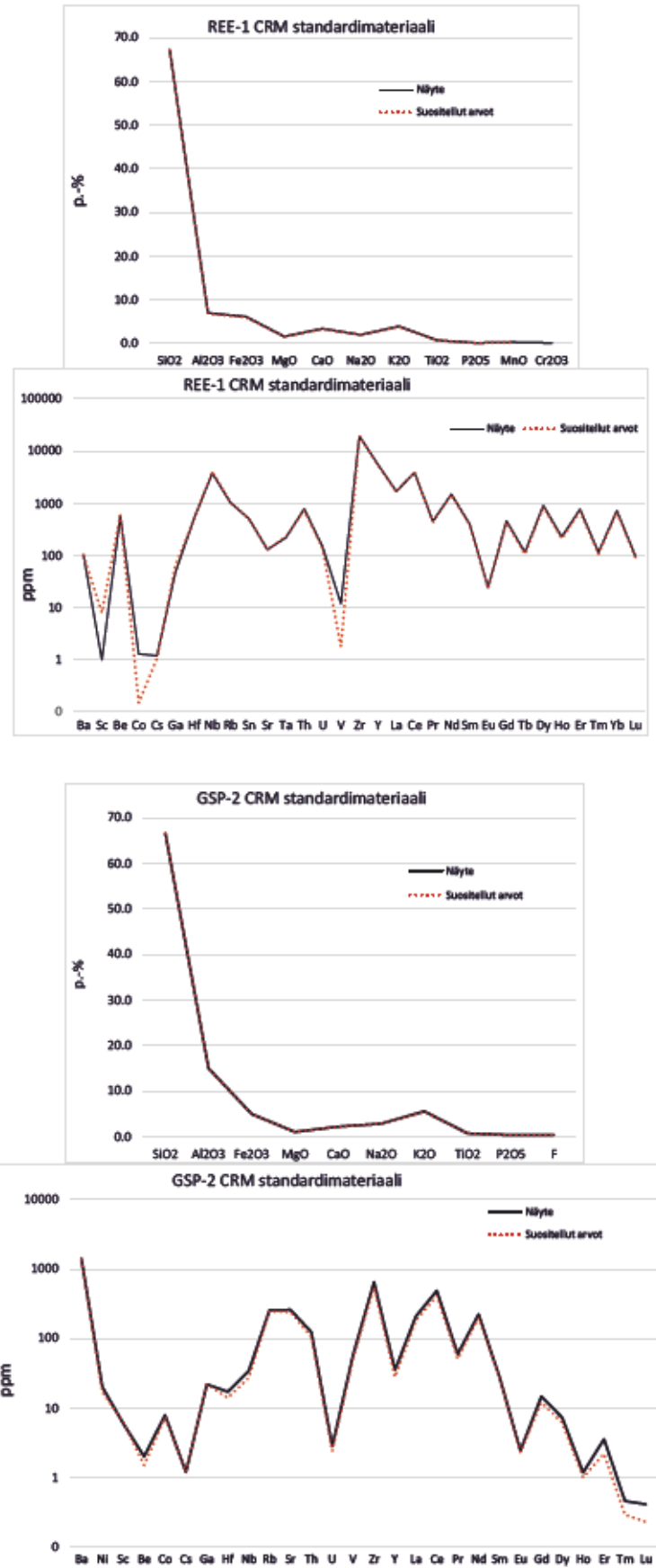


**Liite 5. Bureau Veritaksessa tehtyjen kokokivianalyysien tulokset.**

Alkuaine	Yksikkö	Määrittä- raja	JIJ-18- L159	JIJ-18- L169.2	JIJ-18- L182	JIJ-18- L191	JIJ-18- L207	JIJ-18- L213	JIJ-18- L218	JIJ-18- L227
SiO <sub>2</sub>	p.-%	0.01	48.19	69.84	75.18	73.03	64.2	49.66	70.28	73.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	p.-%	0.01	10.34	6.83	3.85	5.08	8.58	4.39	5.64	6.41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	p.-%	0.04	16.36	9.22	1.52	3.19	8.52	10.05	6.82	6.13
MgO	p.-%	0.01	0.72	0.26	0.2	0.34	0.43	2	0.34	0.93
CaO	p.-%	0.01	8.7	2.57	6.63	6.54	3.61	25.07	4.88	3.6
Na <sub>2</sub> O	p.-%	0.01	1.15	1.38	0.19	0.84	0.47	0.6	0.42	0.27
K <sub>2</sub> O	p.-%	0.01	5.74	3.78	1.82	1.44	3.31	1.14	2.21	0.8
TiO <sub>2</sub>	p.-%	0.01	1.04	0.73	0.32	0.38	0.68	0.99	0.48	0.39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	p.-%	0.01	0.18	0.03	0.06	0.02	0.02	0.26	0.04	0.09
MnO	p.-%	0.01	0.31	0.09	0.19	0.1	0.17	0.2	0.16	0.1
F	p.-%	0.01	0.16	0.92	1.41	0.09	0.18	12.86	0.17	0.09
LOI	p.-%	-5.1	1.6	1.2	4.4	5.4	3.5	2.9	4	2.9
TOT/C	p.-%	0.02	0	0	1	1	0	0	1	0
Summa	p.-%	0.01	94.33	95.93	94.5	96.41	93.66	97.33	95.33	94.98
Nb	ppm	0.1	1855	447	6206	1907	3895	1176	2490	3786
Ta	ppm	0.1	331	61	349	130	256	22	163	222
Hf	ppm	0.1	600	603	144	346	630	38	430	167
Zr	ppm	0.1	25111	24098	7598	14572	26193	2056	18140	9071
Th	ppm	0.2	511	487	1259	499	898	787	705	1446
U	ppm	0.1	155	45	338	126	225	106	165	317
Y	ppm	0.1	1920	784	2193	1068	1951	2848	1488	2415
La	ppm	0.1	2832	554	4877	1674	2758	2924	2280	4200
Ce	ppm	0.1	5580	786	10569	3418	5834	5210	4863	9360
Pr	ppm	0.02	630	80	1217	401	666	526	555	1088
Nd	ppm	0.3	2154	277	4344	1413	2378	1728	1994	3849
Sm	ppm	0.05	344	65	832	260	451	262	372	754
Eu	ppm	0.02	40	9	93	22	42	32	34	68
Gd	ppm	0.05	289	78	692	211	401	278	309	636
Tb	ppm	0.01	48	16	100	34	65	59	47	97
Dy	ppm	0.05	301	118	516	214	381	467	278	528
Ho	ppm	0.02	67	30	90	45	77	113	57	95
Er	ppm	0.03	201	107	230	137	217	353	166	245
Tm	ppm	0.01	30	18	29	20	30	47	23	30
Yb	ppm	0.05	204	126	155	119	178	278	140	162
Lu	ppm	0.01	30	19	18	16	24	40	19	19
Ba	ppm	1	350	125	1027	102	947	99	422	162
Ga	ppm	0.5	45.1	39.2	25.5	26.5	35.5	17.7	35.8	28.6
Rb	ppm	0.1	298	444	150	123	248	90	190	52
Sr	ppm	0.5	209	35	198	213	408	227	302	337

Alkuaine	Yksikkö	KAKA- 18-L4	LER- 18-L1	JIJ-18- L21	JIJ- 18- L29	JIJ- 18- L52	JIJ- 18- L113	JIJ- 18- L114	JIJ- 18- L124	JIJ- 18- L144
SiO <sub>2</sub>	p.-%	71.63	64.21	71.43	73.22	75.14	72.1	69.18	76.47	69.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	p.-%	6.68	7.16	5.98	4.4	7.58	6.05	5.16	7.65	8.12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	p.-%	4.47	5.58	7.57	6.63	0.75	7.92	9.73	3.2	5.94
MgO	p.-%	0.25	0.13	0.09	0.43	0.14	0.21	0.54	0.31	0.39
CaO	p.-%	4.37	5.68	2.99	5.84	4.86	4.62	5.42	1.4	0
Na <sub>2</sub> O	p.-%	0.34	0.29	0.4	0.13	1.34	0.3	0.15	0.38	0.87
K <sub>2</sub> O	p.-%	2.23	2.54	3.06	0.15	4.09	0.4	0.27	1.16	0.28
TiO <sub>2</sub>	p.-%	0.36	0.16	0.49	0.39	0.35	0.51	0.39	0.7	0.41
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	p.-%	0.07	0.12	0.02	0.11	0.02	0.03	0.06	0.05	0.16
MnO	p.-%	0.19	0.29	0.18	0.18	0.12	0.13	0.18	0.09	0.14
F	p.-%	0.1	0.03	0.06	0.04	0.71	0.25	0.04	0.02	0.04
LOI	p.-%	3.7	6.2	2.4	2.3	3.4	2.5	2.7	2.4	2.4
TOT/C	p.-%	0.44	1	0.39	0.21	0.73	0.06	0.17	0.08	0.07
Summa	p.-%	94.3	92.42	94.66	93.81	97.84	94.84	93.86	93.87	93.96
Nb	ppm	4706	7539	2987	11077	1041	2924	3945	2719	2674
Ta	ppm	266	333	182	478	77	180	334	197	196
Hf	ppm	209	184	486	159	177	519	201	610	119
Zr	ppm	10642	9735	21413	8408	7634	21504	10485	25848	6653
Th	ppm	1474	1622	691	1458	333	594	1819	896	1005
U	ppm	401	417	80	345	68	198	399	143	283
Y	ppm	2562	3450	1780	2668	672	1224	3201	1576	3926
La	ppm	4712	7291	2326	4445	1224	2242	5567	3013	6358
Ce	ppm	10244	15972	4891	9670	2225	4766	12016	6501	14671
Pr	ppm	1184	1831	561	1131	248	540	1407	749	1706
Nd	ppm	4209	6559	1994	4124	864	1914	5051	2671	6145
Sm	ppm	820	1259	389	804	140	358	989	523	1128
Eu	ppm	77	117	38	87	16	32	95	53	84
Gd	ppm	698	1032	364	713	125	287	856	446	1018
Tb	ppm	104	148	59	111	21	42	133	67	163
Dy	ppm	571	778	341	616	137	236	720	357	944
Ho	ppm	105	136	66	109	28	47	132	61	182
Er	ppm	274	340	182	274	82	133	337	141	488
Tm	ppm	35	40	23	33	11	18	41	16	61
Yb	ppm	191	208	136	173	66	114	217	92	326
Lu	ppm	22	23	18	20	9	16	25	12	37
Ba	ppm	358	541	307	95	216	160	161	411	244
Ga	ppm	36	46	41	30	32	38	37	31	33
Rb	ppm	140	82	218	28	175	27	25	76	16
Sr	ppm	288	518	354	260	136	423	296	175	449

# **Liite 6. Laboratorioanalyysien standardien vertailu referenssiarvoihin**





Liite 7. Rautaruukki Oy:n teettämät XRF-spektrometrin mittaustulokset, Tyyppi 1

Havainto- numero	X (K(K3))	Y (K(K3))	SiO <sub>2</sub> (p-%)	TiO <sub>2</sub> (p-%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (p-%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (p-%)	MgO (p-%)	CaO (p-%)	Na <sub>2</sub> O (p-%)	K <sub>2</sub> O (p-%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (p-%)	S (p-%)	Sum (ppm)	Nb (ppm)	Ta (ppm)	Zr (ppm)	Hf (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	V (ppm)	La (ppm)	Ce (ppm)	Pr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Gd (ppm)	Tb (ppm)	Pb (ppm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Ba (ppm)
7783-0008	3505900	7109620	46.39	0.23	5.65	3.18	0.29	2.97	0.39	2.95	0.30	0.16	62.64	5100	270	7290	350	860	190	2190	3240	7110	930	3080	610	50	810	0	290	130	170	300
7783-0008	3505700	7109420	77.66	0.17	3.66	4.41	0.33	2.04	0.13	1.39	0.21	0.43	90.65	4620	270	1090	510	1380	250	2980	4800	10600	1310	4440	870	60	1140	0	450	140	190	1380
7783-0067	3504080	7109660	75.01	0.17	4.92	4.50	0.52	4.17	0.02	0.66	0.36	0.00	90.33	6770	350	8490	400	1030	260	2480	3730	8370	1050	3550	720	50	930	0	270	60	370	400
7783-0065	3504120	7108660	74.33	0.16	3.01	6.30	0.44	4.42	0.16	0.54	0.24	0.17	90.41	8900	380	5830	300	970	240	2700	5200	11400	1420	4810	960	60	1190	0	250	90	210	140
7783-0064	3502220	7115020	75.93	0.20	5.28	3.78	0.24	4.14	0.38	0.28	0.24	0.05	90.72	3580	230	9150	440	1160	210	1990	2870	6580	850	2900	590	40	740	0	220	20	450	270
7783-0047	3502240	7114940	70.78	0.19	5.50	2.70	0.14	7.56	1.36	0.30	0.15	0.03	88.71	4810	240	13200	630	1310	220	2610	3540	7960	1000	3380	680	60	880	0	280	30	370	150
7783-0046	3501980	7113600	78.01	0.15	4.22	3.83	0.22	1.87	0.12	1.50	0.16	0.12	90.84	9520	460	10300	480	1290	270	2580	3590	7910	970	3410	670	40	880	0	1650	90	240	290
7783-0045	3502140	7113460	76.79	0.23	3.91	4.93	0.35	1.65	0.08	1.63	0.28	0.13	90.96	3870	230	13100	610	1620	220	2690	4320	9530	1190	4110	790	70	1010	0	340	120	250	300
7783-0044	3503800	7111220	72.04	0.19	4.43	6.33	0.32	5.19	0.25	0.84	0.15	0.08	89.84	8100	410	11000	510	1490	350	3750	6450	14600	1750	6250	1260	100	1590	0	350	100	510	240
7783-0043	3503810	7111180	76.73	0.21	3.25	3.32	0.16	5.57	0.10	0.49	0.11	1.02	91.08	9570	500	10900	490	1460	360	3850	5780	13300	1620	5760	1190	100	1470	0	410	50	240	140
7783-0042	3503830	7111130	77.25	0.16	3.78	2.64	0.07	3.59	0.55	0.77	0.19	0.04	89.04	5000	270	11600	530	1360	250	2630	3250	7370	920	3190	620	30	830	0	270	40	240	250
7783-0041	3503860	7111140	77.29	0.14	3.05	2.80	0.15	4.70	0.26	5.18	0.15	0.19	94.08	6900	360	8490	390	1050	280	2880	4900	11000	1340	4660	950	80	1200	0	260	50	220	70
7783-0040	3503630	7110370	77.71	0.15	3.52	0.89	0.15	5.32	0.42	1.16	0.23	0.01	89.56	5790	310	10900	490	1320	260	2630	3670	8100	1000	3500	690	60	870	0	270	80	140	610
7783-0039	3504420	7110470	77.06	0.21	3.63	1.11	0.08	3.87	0.23	1.24	0.18	0.33	87.98	6230	340	13800	630	1670	330	3370	4760	10600	1300	4480	880	70	1110	0	400	70	260	190
7783-0038	3504470	7110480	66.66	0.25	3.96	4.14	0.10	9.41	0.21	0.38	0.28	0.18	85.57	8840	420	14900	650	1710	590	4280	6760	15000	1770	6410	1280	110	1610	0	490	30	440	90
7783-0037	3504460	7110580	79.95	0.17	3.44	4.61	0.22	1.98	0.19	1.49	0.17	0.29	94.26	5690	320	11100	560	1320	230	2710	3910	8560	1040	3710	740	60	940	0	260	80	230	1250
7783-0036	3504000	7111200	75.74	0.21	4.85	1.98	0.14	4.31	0.49	2.58	0.18	0.25	90.74	5060	250	6540	310	840	170	1860	2980	6400	810	2710	530	50	690	0	240	110	240	250
7783-0035	3504020	7110990	76.60	0.18	4.77	2.29	0.17	4.37	0.66	2.03	0.23	0.02	91.32	4830	260	13600	650	1060	210	2520	3210	7050	880	3100	590	40	770	0	290	130	260	210
7783-0034	3503960	7111000	74.82	0.18	3.92	6.82	0.26	3.01	0.31	1.63	0.15	0.38	94.06	7260	390	12800	590	1690	290	3050	3910	8770	1110	3770	790	60	1020	0	400	110	300	1490
7783-0033	3503960	7111000	80.65	0.17	3.04	4.22	0.22	3.46	0.17	0.58	0.12	0.12	92.77	8210	420	11100	510	1410	270	2610	4070	9060	1180	3870	750	50	990	0	310	80	260	150
7783-0032	3504000	7110960	79.03	0.21	3.75	3.19	0.13	3.50	0.25	0.48	0.44	0.10	91.16	7220	310	9170	410	1160	280	2830	4650	10600	1300	4540	850	50	1110	0	270	40	190	160

Sample	X (K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	Y (K <sub>2</sub> AlSiO <sub>4</sub> )	SiO <sub>2</sub> (p.p.m.)	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>T</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F	S	Sum (p.p.m.)	Nb	Ta	Zr	Hf	Th	U	V	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Pb	Rb	Sr	Ba
7783-0010	3504042	7110860	77.11	0.17	3.43	2.89	0.12	4.86	0.88	0.15	0.22		0.41	90.24	6510	340	12000	550	1490	290	3090	4450	9730	1180	4150	820	60	1050	350	20	290	110
7783-0030	3504040	7110860	78.78	0.18	4.24	2.08	0.07	3.99	0.35	1.51	0.13		0.03	91.33	4210	240	13000	600	1450	270	2470	4020	8930	1070	3770	730	60	930	310	60	290	270
7783-0029	3504060	7110860	74.07	0.19	2.65	4.23	0.25	8.08	0.09	0.50	0.13	0.71	0.07	90.97	7800	370	12500	590	1580	320	2940	4500	9970	1230	4300	860	50	1070	360	70	260	70
7783-0028	3504060	7110860	77.60	0.20	4.87	4.75	0.35	1.08	0.15	2.67	0.20		1.70	93.57	6480	320	14200	650	1320	280	3300	4590	10300	1240	4270	810	70	1080	330	110	200	370
7783-0027	3504300	7110830	80.11	0.19	3.62	3.13	0.31	2.62	0.08	1.42	0.18	0.39	0.49	92.52	3860	240	12300	580	1690	300	2910	4700	10400	1280	4440	850	60	1120	500	90	340	320
7783-0026	3504310	7110800	72.43	0.15	3.29	1.69	0.18	7.53	0.19	1.34	0.19	0.87	0.03	87.89	5470	270	10700	490	1370	250	2660	3820	8410	1060	3530	620	10	830	370	80	270	280
7783-0025	3504310	7110800	80.24	0.16	3.02	1.78	0.06	3.35	0.28	1.16	0.20	0.19	0.02	90.45	5210	300	10800	500	1490	280	2840	4340	9680	1190	4120	800	60	1010	490	60	210	220
7783-0024	3504420	7110760	80.55	0.15	2.75	1.93	0.05	3.50	0.31	0.77	0.24	0.48	0.03	90.76	6460	340	9540	430	1150	290	1600	3900	8850	1070	3780	780	70	1020	360	50	170	110
7783-0022	3505530	7109040	79.82	0.18	3.38	3.59	0.14	4.16	0.26	0.16	0.24	0.30	0.00	92.22	5100	290	11500	520	1520	220	2750	4210	9290	1160	4010	780	70	1040	270	30	190	130
7783-0021	3505520	7109120	78.11	0.19	3.40	4.31	0.39	2.75	0.16	0.73	0.20	0.12	0.13	90.49	5720	320	12900	590	1670	260	3040	4560	10200	1250	4350	840	60	1090	470	110	250	390
7783-0019	3505600	7109420	77.74	0.14	2.51	2.41	0.35	4.21	0.16	0.86	0.20	0.24	0.55	89.36	6860	390	7710	370	1090	250	2630	4470	10300	1300	4390	840	40	1090	4150	60	210	1270
7783-0018	3505600	7109440	78.44	0.15	3.12	1.27	0.27	5.11	0.26	1.62	0.25	0.55	0.01	91.06	6390	320	8380	390	1040	260	2300	4020	8930	1130	3890	830	80	1040	1000	110	180	1100
7783-0017	3505600	7109440	78.80	0.18	4.55	0.93	0.14	3.45	0.45	3.10	0.29	0.12	0.03	92.05	5620	280	6480	310	790	170	1830	2680	5930	740	2590	500	50	690	3280	200	130	1550
7783-0016	3505660	7109460	77.94	0.16	3.31	2.46	0.15	4.10	0.85	1.03	0.21	0.14	0.45	90.79	5610	310	6900	350	1190	260	2350	3560	7980	1040	3400	660	40	880	310	110	200	920
7783-0015	3505630	7109500	83.46	0.16	3.18	3.43	0.24	0.85	0.04	1.22	0.12		0.16	92.87	5960	320	11300	5300	1410	280	2670	4080	9020	1130	3860	750	50	980	320	80	170	820
7783-0014	3505542	7109500	79.81	0.17	3.35	3.11	0.42	2.90	0.10	1.61	0.21	0.20	0.48	92.36	8780	420	10700	490	1250	320	2720	3610	7940	1020	3360	680	60	880	400	120	190	1970
7783-0013	3505540	7109500	81.42	0.15	2.84	1.89	0.10	3.32	0.15	1.24	0.40	0.16	0.12	91.79	4270	280	9800	480	1310	230	2700	3900	8800	1100	3780	730	50	970	355	80	170	1090
7783-0012	3505490	7109520	77.26	0.12	2.90	6.93	0.17	3.66	0.02	0.17	0.09		1.45	92.77	7660	350	9140	420	1140	300	3140	5620	12600	1540	5370	1090	60	1370	300	40	220	60
7783-0011	3505490	7109520	84.00	0.14	2.50	1.61	0.11	2.88	0.26	1.04	0.14		0.09	92.46	6860	330	8340	390	1040	240	2690	4400	9890	1250	4210	850	70	1070	460	50	150	910
7783-0010	3505470	7109570	75.29	0.13	3.56	4.44	0.33	5.33	0.38	1.03	0.30	0.27	0.20	91.25	11700	520	9720	440	1150	390	2960	5100	11000	1400	4450	900	40	1130	350	130	230	100
7783-0009	3505470	7109600	75.80	0.35	3.73	2.08	0.26	6.34	0.29	2.08	0.06	0.15	0.13	91.28	1760	150	18500	950	470	90	1210	1360	3020	410	1360	250	30	340	280	800	190	420

Element	K (K/L)	V (K/L)	SiO <sub>2</sub> (wt-%)	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F	S	Sum	Nb	Ta	Zr	Hf	Th	U	V	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Pb	Rb	Sr	Ba	Be
7783- 2007	3.505480	7.109680	80.88	0.17	3.09	4.44	0.16	3.16	0.30	0.76	0.17		0.00	93.13	5780	330	11100	530	1420	280	27.50	38.50	8460	1050	3650	730	50	9.50	0	0	0	0	0	0	0	280	80	170	220	0
7783- 2006	3.505500	7.109710	80.58	0.17	3.36	3.04	0.29	2.20	0.35	0.55	0.36	0.12	0.03	91.05	6590	340	11000	520	1330	310	30.90	4280	9660	1230	4280	850	60	1090	0	0	0	0	0	0	0	330	40	240	110	0
7783- 2004	3.505520	7.109530	79.98	0.13	2.80	1.80	0.11	4.48	0.22	1.29	0.26		0.04	91.12	5790	290	9740	440	1120	240	30.50	4380	9620	1260	4190	810	50	1060	0	0	0	0	0	0	0	800	110	230	1300	0
7783- 2003	3.505510	7.109525	80.25	0.21	4.27	1.18	0.22	3.92	0.41	3.10	0.03	0.26	0.08	93.92	2210	130	14100	710	390	60	940	1780	3370	450	1490	240	20	380	0	0	0	0	0	0	0	250	130	130	480	0
7483- 8211	3.505640	7.113440	73.94	0.28	5.90	0.08	0.85	2.48	0.30	1.16	0.15		0.06	85.20	5540	320	18000	1070	1360	230	26.40	3270	7250	960	3150	550	30	800	0	0	0	0	0	0	0	280	120	360	590	0
7483- 8208	3.505690	7.113410	83.37	0.11	3.25	0.10	0.54	1.14	0.17	0.79	0.12		0.08	89.65	3110	170	5270	380	870	100	1220	3060	5940	800	2500	430	30	630	0	0	0	0	0	0	0	180	60	240	570	0
7483- 8207	3.505930	7.113300	74.30	0.19	5.37	0.35	0.46	6.01	0.47	0.19	0.11		0.28	87.73	4930	240	12100	730	1140	220	23.30	2560	5650	760	2470	460	20	670	0	0	0	0	0	0	0	320	30	790	50	0
7483- 8206	3.505940	7.113140	74.94	0.21	5.76	0.08	0.97	2.06	0.60	1.40	0.18		0.06	86.27	4710	270	13400	780	1350	220	25.90	3180	7020	960	3050	590	20	830	0	0	0	0	0	0	0	270	140	300	1400	0
7483- 8204	3.501550	7.114810	72.77	0.19	5.24	0.00	0.18	9.26	0.63	2.46	0.14		0.00	90.87	6900	450	10000	440	1320	380	28.20	3320	7610	940	3200	760	130	980	110	590	0	420	20	170	0	130	170	450	170	
7483- 8203	3.501750	7.114700	76.44	0.18	4.63	0.01	0.23	3.17	0.31	1.05	0.22		0.01	86.24	1950	150	8760	510	990	180	1860	2890	6550	900	2860	580	30	790	0	0	0	0	0	0	0	120	60	210	350	0
7483- 8205	3.502740	7.114470	33.63	0.48	4.50	2.80	0.54	24.10	0.12	1.10	0.12		0.00	89.39	810	190	23600	1440	610	60	3200	3980	7460	960	3120	560	30	790	0	0	0	0	0	0	0	130	90	200	80	0
7483- 8203	3.502880	7.114350	73.97	0.27	4.44	7.38	0.98	5.92	0.28	0.47	0.08		0.11	93.96	2250	170	15500	950	450	80	16.40	2100	4020	610	1820	320	30	460	0	0	0	0	0	0	0	120	40	250	280	0
7483- 8204	3.501660	7.114250	79.12	0.18	3.58	2.33	0.10	4.82	0.26	1.43	0.21		0.08	92.11	1150	350	7540	420	970	210	2490	4640	1030	1240	4090	840	70	1130	0	0	0	0	0	0	0	290	70	240	220	0
7483- 8203	3.502320	7.113270	78.79	0.16	3.49	1.18	0.12	5.49	0.27	1.97	0.18		0.01	91.65	6210	330	7780	440	860	240	2200	3360	7480	1000	5220	650	40	900	0	0	0	0	0	0	0	570	110	160	190	0
7483- 8209	3.502010	7.112040	81.54	0.21	3.28	2.46	0.13	3.49	0.17	0.58	0.17		0.00	92.03	9610	540	10400	560	1520	310	28.30	4380	1010	1350	4280	820	50	1130	0	0	0	0	0	0	0	310	50	140	260	0
7483- 8204	3.502790	7.112260	78.16	0.18	3.57	5.85	0.34	2.59	0.15	0.52	0.23		0.47	92.07	7510	410	8320	460	1100	390	32.10	5510	1250	1520	5250	1030	60	1370	0	0	0	0	0	0	0	350	70	220	120	0
7483- 8203	3.502720	7.112440	78.65	0.21	4.88	3.64	0.06	2.61	0.24	2.60	0.09		0.64	93.61	4650	320	11700	710	1040	190	23.10	3340	7490	980	3250	650	50	880	0	0	0	0	0	0	0	300	100	190	380	0
7483- 8203	3.502250	7.111310	79.31	0.20	4.12	3.46	0.09	3.14	0.22	1.01	0.11		0.40	92.04	7400	390	10000	550	1300	320	27.80	5210	1200	1540	5180	980	50	1310	0	0	0	0	0	0	0	330	50	260	230	0
7483- 8204	3.501820	7.114010	76.81	0.27	5.72	6.78	0.08	1.78	1.41	1.76	0.04		0.03	94.67	1800	160	13400	830	350	60	1110	1800	3510	490	1590	290	30	400	0	0	0	0	0	0	0	130	60	230	440	0
7483- 8201	3.501980	7.113640	78.69	0.16	4.00	4.64	0.14	2.48	0.10	1.04	0.16		0.82	92.24	8490	500	11600	650	1510	390	35.20	4200	9380	1240	4080	800	0	1130	0	0	0	0	0	0	0	440	0	210	250	0
7483- 8204	3.502400	7.112340	80.22	0.19	4.53	3.38	0.14	2.76	0.94	0.30	0.18		0.17	92.80	5230	300	10600	600	1300	190		4090	9590	0	0	0	60	1130	0	0	0	0	0	0	0	250	0	310	110	0



Elemento numeros	X (KKJ3)	Y (KKJ3) p- %	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Sum ma (ppm)	Ta	Zr	Hf	Th	U	V	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Pb	Rb	Sr	Ba	Be	
7483_5004	3.502060	7113692	82.73	0.17	2.64	4.40	0.19	2.00	0.25	0.42	0.16	0.22	95.18	6980	420	7300	390	1000	250	3850	8970	0	0	0	60	1060	0	0	0	0	0	0	0	250	0	190	240	0	
7385_6029	3.498140	7120390	69.19	0.37	5.13	8.62	0.17	0.48	3.00	2.47	0.21	0.01	88.65	1190	580	1660	550	530	1530	3350	6670	840	2680	490	40	450	60	360	0	0	70	140	0	190	120	40	200	140	
7385_6018	3.496410	7116620	76.05	0.33	5.51	5.84	2.13	0.51	0.02	2.44	0.13	0.00	94.96	2050	120	1740	820	480	90	820	1140	2970	310	1210	250	30	190	20	170	20	80	30	60	30	110	80	60	420	60
7385_6012	3.496720	7114700	79.07	0.35	5.69	4.19	0.07	2.96	0.28	1.72	0.02	0.06	94.41	3280	150	1890	1130	660	140	790	2000	4230	550	1920	380	20	340	60	230	0	0	20	30	40	220	70	280	510	30
7385_6011	3.496680	7114780	75.34	0.32	5.54	8.07	0.15	1.29	0.62	1.90	0.05	0.01	93.29	2830	150	2410	1230	660	130	1380	1880	4090	550	1850	360	20	260	20	260	30	0	30	80	0	210	70	170	730	80
7385_6008	3.500480	7110200	76.89	0.37	5.69	5.65	0.96	1.58	1.10	1.88	0.16	0.02	94.64	2190	300	2330	1140	1660	140	1430	580	1290	110	680	150	30	110	30	310	70	90	70	200	20	220	90	320	200	
7385_6001	3.498750	7111720	78.69	0.16	4.00	4.64	0.14	2.48	0.10	1.04	0.16	0.82	92.24	4900	500	1160	650	1510	390	4200	9380	0	0	0	60	1130	0	0	0	0	0	0	0	440	0	210	250	0	
7384_7787	3.498900	7111500	76.46	0.24	6.26	4.00	0.09	2.51	0.64	1.46	0.17	0.04	91.88	1020	1060	1000	640	1560	450	2590	2830	6090	790	2630	850	220	1070	220	680	0	130	160	140	140	0	50	360	440	140
7384_7772	3.497450	7114140	72.89	0.29	4.71	6.19	0.20	7.53	0.46	0.23	0.07	0.01	92.58	2810	220	2430	990	670	90	1600	1900	4260	580	1790	430	100	490	60	260	0	160	30	110	0	0	40	260	110	110
7384_7770	3.499620	7111490	75.67	0.11	4.48	4.31	0.48	5.48	0.41	0.18	0.31	0.07	91.51	1550	160	9540	610	9820	280	2660	9910	13000	1610	5530	1140	120	1510	160	820	0	420	90	400	0	0	50	190	190	400
7384_7767	3.499720	7112220	77.76	0.29	4.36	5.09	0.18	4.21	0.48	1.90	0.10	0.01	94.40	2560	220	1180	820	490	90	810	930	2070	230	880	330	170	340	100	190	0	450	70	130	10	0	160	230	480	130
7384_7766	3.499560	7111140	74.21	0.35	5.48	6.97	0.74	5.77	0.22	0.36	0.12	0.56	94.77	1670	160	1560	450	90	1040	1220	2520	310	1170	310	90	340	50	180	0	270	10	70	0	0	40	220	260	70	
7384_7765	3.499420	7112690	73.59	0.29	5.35	4.79	0.22	7.31	0.39	0.15	0.06	0.00	92.15	2860	240	2180	1060	650	90	1370	1790	4010	480	1710	500	170	570	130	320	0	550	90	160	30	0	40	360	130	160
7384_7757	3.500680	7114060	76.97	0.17	4.39	7.58	0.19	2.37	0.31	0.56	0.19	0.01	92.73	7950	450	9850	400	1330	290	1970	3500	7710	9700	3190	690	90	840	60	370	0	190	0	100	0	0	70	270	660	100
7384_7755	3.500960	7113640	75.31	0.19	3.54	6.95	0.14	4.96	0.17	0.12	0.12	0.00	91.50	7940	470	1040	1530	290	1660	4170	9300	1140	3860	830	140	970	110	350	0	480	40	110	0	0	30	270	170	110	
7384_7754	3.501000	7113620	76.48	0.18	4.17	5.54	0.41	4.48	0.33	0.94	0.27	0.01	92.81	6290	420	9430	420	1360	320	2470	3820	8470	1050	3540	750	110	990	100	480	0	400	50	140	0	0	120	220	360	140
7384_7752	3.501110	7113420	75.08	0.22	4.26	7.64	0.47	2.29	0.70	2.09	0.26	0.02	93.03	5780	310	1230	530	870	220	1910	2500	5760	7	2400	650	140	760	100	410	0	280	30	110	0	0	100	130	330	110
7384_7569	3.499170	7113000	81.10	0.28	5.04	3.47	0.13	2.07	0.65	2.62	0.05	0.01	95.42	1950	190	1060	660	520	30	1050	1120	2550	310	1090	330	130	390	90	230	0	350	60	120	40	0	140	160	370	120
7384_7507	3.500850	7112390	80.81	0.11	3.85	4.85	0.08	4.07	0.16	0.06	0.12	0.01	94.12	5520	290	3810	340	110	950	4380	8790	1090	3650	750	110	890	90	230	0	50	10	0	0	0	20	330	420	0	
7384_7506	3.500680	7114030	76.22	0.18	3.87	6.48	0.52	2.36	0.09	0.85	0.84	0.40	91.82	6470	420	9740	410	1340	300	2850	4280	9410	1160	3980	950	190	1180	170	610	0	620	100	190	0	0	180	200	250	190
7384_7504	3.500790	7113890	77.45	0.18	4.50	4.79	0.23	3.86	0.42	0.52	0.23	0.02	92.26	4920	320	1040	410	1420	260	2420	4010	8910	1100	3780	820	140	1050	140	480	0	270	60	140	0	0	90	160	450	140
7384_7502	3.501050	7113460	72.81	0.37	4.91	7.13	0.49	4.50	0.74	2.91	0.12	0.02	93.99	1540	210	1440	640	210	50	2100	1650	3000	350	1250	400	130	500	90	370	0	330	50	190	0	0	200	70	140	190



## Tyypit 2–5

Element (X, Y)	X (KX)	Y (KY)	Typ (p. %)	SO <sub>2</sub>	TO <sub>2</sub>	AAO	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F	S Sum (ppm)	Nb (ppm)	Ta	Zr	Hf	Ti	V	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Pu	Am	Sr	Ba	Th	
734- 7778	34064711632 40 40	2	74.68	0.19	11.65	2.30	0.48	1.76	3.72	3.54	0.02			0.00	98.29	90	40	910	50	370		110	190	420	50	150	110	90	100	50	40	0	380	30	20	40	0	100	40	310	20
734- 7893	3409771106 50 80	2	71.83	0.14	10.03	2.01	0.51	7.41	2.89	1.54	0.07			0.00	96.43	110	40	1230	70	430		250	290	700	80	230	120	80	100	40	50	0	250	30	30	60	0	100	270	310	30
734- 6017	3406471160 30 20	2	76.97	0.37	6.56	4.25	0.72	1.35	0.00	3.48	0.06			0.00	93.70	3300	180	2300	150	500	100	790	1120	3360	300	1280	280	40	210	40	170	20	20	10	30	50	90	110	230	590	30
734- 7316	3407771151 40 00	2	75.72	0.09	7.37	7.13	1.68	0.70	2.41	0.65	0.05			0.35	96.15	3470	160	1840	120	160	130	920	1620	3160	380	1160	38	120	470	80	240	0	100	50	40	0	0	40	80	120	40
734- 7511	3406371157 80 40	2	63.77	0.18	12.20	8.61	0.33	3.96	5.57	1.54	0.25			0.02	96.42	1670	90	220	110	1340	50	290	1230	2380	250	650	210	110	230	50	90	0	410	20	40	0	0	70	100	290	40
734- 7504	3509071148 60 80	2	69.01	0.13	12.90	4.98	0.16	2.70	6.56	0.32	0.02			0.01	96.79	460	70	400	30	110	60	150		50	10	40	220	190	170	130	150	30	110	110	50	0	0	30	20	50	50
734- 7503	3509071138 10 70	2	76.42	0.20	7.06	5.34	0.20	2.42	0.75	3.60	0.05			0.04	96.17	1270	90	830		230	40	1050	2090	270	920	240	90	1050	140	480	0	140	10	50	0	0	90	170	790	50	
734- 7791	3406371164 20 00	2	71.69	0.21	12.71	2.89	0.43	1.10	5.04	1.09	0.21			0.01	97.39	560	30	570	30	430	50	380	860	1500	170	470	170	110	200	50	160	0	50	50	60	20	0	30	80	140	60
734- 7761	3409471144 00 62	2	75.40	0.19	8.04	5.27	0.32	1.58	0.53	4.46	0.03			0.07	95.88	890	100	6470	400	170	40	580	890	1760	220	740	240	120	260	60	120	0	440	30	60	20	0	170	140	780	60
734- 7758	3409371139 20 80	2	73.60	0.28	7.80	5.63	0.55	0.94	2.25	4.00	0.05			0.00	95.11	1460	180	1690	850	380	70	690	490	1180	170	560	180	80	210	50	140	0	250	20	70	0	0	170	50	260	70
734- 7523	3406671148 20 00	2	72.32	0.27	6.11	9.94	0.57	0.91	0.55	2.10	0.05			0.04	92.86	2390	160	2060	1370	720	120	1460	1860	4020	500	1710	430	120	530	60	270	0	170	30	80	0	0	80	170	820	80
734- 7517	3406671152 40 60	2	79.23	0.32	6.62	4.23	0.31	2.16	0.58	1.25	0.05			0.00	94.75	2150	180	6720	490	610	130	1060	2240	4750	600	1980	540	170	640	120	290	0	220	90	80	10	0	90	290	1070	80
734- 7793	3409771141 00 00	2	71.73	0.18	10.57	4.68	0.16	0.75	3.14	4.97	0.04			0.01	96.23	850	120	2810	110	260	30	760	300	990	150	590	300	170	300	120	220	20	510	90	110	10	0	210	40	360	110
734- 7795	3409771141 00 00	2	71.73	0.18	10.57	4.68	0.16	0.75	3.14	4.97	0.04			0.01	96.23	850	120	2810	110	260	30	760	300	990	150	590	300	170	300	120	220	20	510	90	110	10	0	210	40	360	110
734- 7774	3409771161 80 00	2	79.36	0.16	8.75	2.73	0.44	1.19	3.25	0.67	0.08			0.04	96.66	1450	110	1540	80	1990	50	390	800	1530	170	480	230	160	240	100	160	0	710	70	120	100	0	40	70	150	120
734- 7510	3409771139 00 80	2	73.57	0.31	6.01	7.28	0.36	2.19	0.42	2.59	0.03			0.04	92.80	4170	240	2040	980	630	190	1600	1880	4190	550	1810	460	120	530	70	290	0	170	40	120	0	0	150	260	480	120
734- 7771	3409771140 40 00	2	74.96	0.28	6.05	7.22	0.15	1.22	1.12	1.66	0.06			0.01	92.71	2600	210	2320	980	680	150	1570	1840	4040	540	1820	430	110	540	80	290	0	210	30	130	0	0	80	190	790	130
734- 7512	3406471160 40 10	2	73.62	0.31	6.09	6.69	2.57	0.61	0.43	2.34	0.03			0.00	92.59	3040	220	2360	1400	700	130	2000	2340	4460	580	2130	490	100	610	60	340	0	390	20	130	0	0	120	110	510	130
734- 7518	3406871143 60 40	2	70.19	0.26	12.51	2.30	0.86	3.78	5.45	0.71	0.16			0.06	96.29	3510	160	2940	190	1670	170	2110	1710	3690	460	1570	440	120	560	90	370	0	220	60	140	40	0	30	140	170	140
734- 7764	3409071126 20 90	2	65.10	0.33	7.69	10.54	0.20	7.59	0.00	0.12	0.05			0.00	91.61	3390	260	2440	1220	690	150	2470	1920	4270	590	1840	500	110	640	80	450	0	410	10	140	0	0	30	490	90	140
734- 7773	3409771154 00 60	2	64.99	0.40	7.77	8.97	0.51	4.46	0.00	3.46	0.04			0.46	91.06	3460	210	3020	1320	790	340	2340	2380	5210	710	2280	530	100	630	70	390	0	180	10	170	0	0	220	320	510	170
734- 7862	3408971126 60 80	2	77.68	0.38	7.15	3.47	0.32	0.64	0.33	1.75	0.05			0.00	91.78	3000	280	2720	1380	740	100	1610	1830	3990	480	1740	480	180	570	140	380	0	590	110	180	70	0	120	100	500	180
734- 6201	3501871146 70 60	2	67.45	0.20	8.08	8.00	0.09	3.50	1.38	2.07	0.08			0.01	90.87	4910	320	1410	640	1710	280	2640	5190	1130	1340	4640	1030	190	1270	150	580	0	530	60	190	0	0	130	310	260	190
734- 7795	3500871131 00 40	2	56.50	0.48	9.89	20.08	0.15	0.08	5.78	0.36	0.06			0.06	93.39	5470	300	1140	980	1290	290	1680	210	570	130	470	240	110	230	50	300	300	100	0	200	0	0	80	30	200	200
734- 6007	3500771102 00 40	2	78.10	0.30	6.40	4.37	0.44	2.43	1.55	1.46	0.14	0.40		0.09	95.68	2870	330	1440	790	1840	140	2110	1030	2220	380	1100	230	50	300	60	470	80	200	50	200	50	270	30	130	320	200
734- 6005	3500371101 40 40	2	63.50	0.32	9.08	8.41	1.18	4.75	1.12	2.34	0.16			0.08	91.00	7200	770	21900	970	4040	400	5150	2520	5490	0	2640	680	90	780	120	1200	190	610	140	590	30	620	90	270	590	590

Handels nummer	KKJ3	KKJ3	Typ	SO <sub>4</sub> (p-3)	NO <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	S	Sum (ppm)	Ta	Zr	Hf	Ti	U	V	La	Co	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Rb	Sr	Ba	Be			
7381_001	8992	71106	5	43.75	0.54	10.20	10.99	0.99	19.74	0.14	0.64	0.02	4.02	91.05	3690	200	55000	2700	910	170	1160	3700	7770	980	3450	630	60	470	50	230	0	0	100	40	250	100	890	180	100	
7381_006	9020	71102	4	47.00	0.04	5.41	21.66	3.89	0.85	0.12	3.11	0.05	0.69	82.97	1160	140	8930	10940	2190	840	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3590	0	140	590	0	
7381_006	9020	71102	4	33.91	0.05	4.90	32.65	4.74	0.60	0.00	1.56	0.11	0.36	78.90	2650	260	9990	11440	820	1380	3380	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15400	0	120	480	0	
7381_002	8981	67203	3	67.60	1.66	2.49	3.87	0.18	0.40	0.96	1.28	2.10	0.01	82.63	16500	570	20800	1500	2150	920	3100	17400	31000	3010	10300	1640	370	1470	250	940	0	840	30	260	80	370	60	70	200	260
7381_002	8981	67203	2	74.59	0.08	13.14	1.38	0.22	0.35	3.62	5.74	0.08	0.13	99.15	620	60	1320	100	130	110	200	60	170	130	40	10	10	10	30	20	0	0	0	60	0	130	20	480	0	
7381_003	8981	67203	2	73.21	0.18	8.82	6.77	0.04	0.13	4.15	3.47	0.03	0.01	96.80	1280	70	10100	520		520	310	540	1160	140	580	130	20	40	10	40	0	0	0	0	0	150	10	80	0	
7381_006	9041	27108	2	69.28	0.50	11.97	5.11	0.91	0.90	3.20	4.46	0.23	0.10	0.01	96.67	60	480	30	20	70	80	50	80	10	10	10	20	0	0	0	0	0	0	0	30	110	140	1050	0	
7381_000	9056	47099	2	72.60	0.18	7.24	6.69	0.45	4.34	1.03	3.37	0.04	0.17	0.07	96.16	490	40	5510	300	140	20	400	610	1200	200	600	90	10	140	0	0	0	0	0	30	110	230	690	0	
7381_001	8981	67147	2	76.00	0.14	11.43	1.48	0.39	1.28	3.35	4.01	0.08	0.06	98.15	90	30	1040	80	230	10	40	50	0	3000	30	10	0	10	10	0	0	0	0	0	50	60	100	40	240	0
7381_003	8981	67203	2	74.36	0.19	10.07	5.08	0.35	0.21	3.33	4.37	0.07	0.03	98.07	120		3010	170	140	20	260	570	1240	130	560	70	20	30	0	30	0	0	0	0	60	180	20	90	0	
7381_001	8918	71140	2	78.24	0.20	6.60	1.05	0.08	4.52	1.23	3.18	0.04	0.13	95.47	1330	110	10200	620	240	40	860	1340	2650	380	1160	210	20	300	0	0	0	0	0	0	90	0	170	360	0	
7381_004	9020	27114	2	70.46	0.18	9.43	6.92	0.40	0.79	3.30	4.93	0.11	0.30	0.01	96.83	270	20	1790	110	1380	10	400	330	700	140	350	30	0	70	0	0	0	0	0	0	110	400	20	50	0
7381_005	8922	71153	2	73.52	0.11	9.28	6.39	0.30	0.97	2.92	4.74	0.04	0.49	0.01	98.76	770	30	4820	240	270	20	230	410	870	150	390	40	10	80	0	0	0	0	0	0	110	400	30	50	0
7381_001	8998	71104	2	68.10	0.53	13.63	5.12	0.46	2.22	3.89	3.73	0.27	0.14	1.00	99.08	50	470	40	410	20	160	330	710	60	350	60	20	0	0	0	30	10	0	0	0	130	80	120	800	0
7381_006	9019	71156	2	64.09	0.19	9.40	8.13	0.84	3.59	3.38	5.36	0.05	1.58	0.00	96.63	590	40	3830	200	2470	30	880	340	820	180	540	110	0	160	0	0	0	0	0	0	170	400	50	70	0
7381_002	8956	67094	2	74.21	0.27	6.31	3.18	0.77	4.50	0.28	3.00	0.08	0.21	93.05	2590	180	22000	1120	600	120	1600	2000	4300	540	1910	310	30	480	0	0	0	0	0	0	0	190	140	200	1420	0
7381_000	8930	71132	2	76.08	0.23	6.20	0.07	0.75	1.19	0.70	2.17	0.10	0.06	87.51	3130	190	14800	900	790	150	1640	1610	3550	490	1650	300	20	440	0	0	0	0	0	0	0	200	170	280	530	0
7381_001	8937	71135	2	73.11	0.24	6.82	0.08	0.44	5.23	1.19	0.60	0.10	0.07	87.87	3210	200	16000	1010	890	150	1900	2000	4850	630	2180	410	30	560	0	0	0	0	0	0	0	220	40	410	140	0
7381_002	8935	70918	2	62.61	0.22	14.23	7.29	0.55	0.60	2.46	8.22	0.04	0.05	96.27	1230	80	12100	640	290	30	820	1530	3010	420	1360	220	10	330	0	0	0	0	0	0	0	220	330	210	690	0
7381_004	9038	71130	2	47.69	0.79	10.47	10.43	2.30	7.74	1.64	6.11	0.25	0.00	87.42	4140	670	52800	3020	790	480	1910	3090	6990	760	2490	400	20	580	0	0	0	0	0	0	240	310	310	520	0	
7381_005	8922	71140	2	68.16	0.05	14.82	1.01	0.32	1.65	5.29	2.81	0.02	0.04	94.16	10		410	40	200	310	50		40	50	80	0	20	30	0	0	0	0	0	0	580	90	130	180	0	
7381_004	9022	71140	2	53.70	0.04	22.02	2.75	0.43	6.04	6.25	0.82	0.05	0.54	92.63	10		180		60	40	30		10	60	90	0	0	10	0	0	0	0	0	0	780	50	420	160	0	
7381_005	8922	71140	2	52.92	0.07	22.36	2.30	0.77	6.52	5.88	0.85	0.13	0.60	92.39	40		430	30	90	230	60	10	70	70	120	20	10	20	0	0	0	0	0	0	0	920	60	520	140	0

**Liite 8. Petrographic descriptions****PETROGRAPHIC DESCRIPTIONS OF REE MINERALIZED  
BOULDERS FROM THE OTANMÄKI AREA, CENTRAL FINLAND****Appendix 8**

Liisa Repo

**1. INTRODUCTION**

The Otanmäki area in central Finland hosts two REE occurrences (Kontioaho, Katajakangas) associated with ca. 2.05 Ga A1-type granites (Kärenlampi et al. 2020). In addition, the Otanmäki area has potential for future REE discoveries, as up to 350 REE mineralized glacial drift boulders have been discovered from the area and preliminary evaluation suggests some of the boulders are likely derived from still unknown bedrock sources. In this Appendix, petrographic descriptions and results of mineralogical and whole-rock analyses of representative REE mineralized boulder samples (n = 19) are given.

**2. METHODS AND MATERIALS**

The boulders were located based on their elevated radioactivity using field scintillometres BGS-3 (Scintrex Geoscientific Sensors) and GT-40 (Georadis s.r.o). Samples of the boulders were collected in the field and cut to slabs by diamond circular saw in Otanmäki at the facilities of Otanmäki Mine Oy. Short macroscopic descriptions were made based on visual inspection of the slab samples. Chemical compositions of the samples were measured by Hitachi Hi-Tech X-MET 8000 portable XRF spectrometer. In addition, a total number of 19 representative samples of different boulder types from various discovery sites in the Otanmäki area were chosen for further study which included petrographic examination, laboratory whole-rock analyses, microprobe analyses of the Nb-Zr-REE-bearing minerals and MLA-based modal quantitative mineralogical analysis. Sample IDs are given in Table 1.

Table 1. List of boulder samples selected for this study.

JIJ-18-L21	JIJ-18-L182
JIJ-18-L29	JIJ-18-L191
JIJ-18-L52	JIJ-18-L197
JIJ-18-L113	JIJ-18-L207
JIJ-18-L114	JIJ-18-L213
JIJ-18-L124	JIJ-18-L218
JIJ-18-L143	JIJ-18-L227
JIJ-18-L144	LER-18-L1
JIJ-18-L159	KAKA-18-L4
JIJ-18-L169.2	

For laboratory whole-rock analysis, sample preparation included crushing and pulverization by a Mn-steel jaw crushed blade and a high-purity tungsten-carbide cobalt mill at the University of Oulu. Whole-rock analyses were made at Bureau Veritas Mineral geolaboratory (Canada) following the protocol LF200, which included lithiumborate fusion and dissolution in nitric acid followed by analysis by ICP-OES (inductively coupled plasma optical emission spectrometry) for elements Si, Al, Cr, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Ti, Ni, Sc and by ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry) for elements Ba, Be, Ce, Co, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zr. Total S and C were analysed by LECO combustion analysis (protocol TC003) and F by fluoride specific ion electrode (protocol GC841).

For petrographic and mineralogical study, 19 polished thin sections were prepared at the University of Oulu. A petrographic microscope with transmitted and reflected light capabilities was used at the University of Oulu to study the rock microtexture and mineralogical composition. Grain size classes used in descriptions are given in Table 2. Modal compositions of the samples were determined using semi-automated scanning of polished thin sections at the GTK, Espoo using a JEOL JSM-7100F field emission scanning electron microscope (FE-SEM) equipped with Oxford Instruments energy-dispersive X-ray detector (EDS). All samples were analysed with the Feature grain X-ray mapping mode. The operation conditions were consistent: accelerating voltage 20 kV and electron beam current 1.3 nA. On average, the thin section measurement comprised of 125 frames with 80 measurements each field (~10 000 in total) and a frame resolution of 5,88  $\mu\text{m}/\text{px}$ . For data acquisition, processing and evaluation was done by Oxford Instruments Inca software suite version 5.05. Each EDS feature point was classified by chemical composition to a mineral class which are presented in Table 3. The modal



proportions (wt.%) was calculated for each mineral by using stoichiometric densities are also given in Table 3.

Table 2. Grain sizes classes used in the petrographic descriptions.

medium-grained	1–5 mm
fine-grained	<1–0.05 mm
very fine-grained	0.05–0.01 mm

Table 3. Minerals found in the Nb-Zr-REE-mineralized boulders from the Otanmäki area together with their mineral class classification thresholds, structural formulae and stoichiometric densities.

Class	Element	Min	Max	Use Threshold	Chemical formula	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Quartz	Si	30	100	Yes	SiO <sub>2</sub>	2.62
	Al	0	5	No		
Calcite	Ca	20	100	Yes	CaCO <sub>3</sub>	2.71
Zircon	Zr	20	100	Yes	ZrSiO <sub>4</sub>	4.65
	Si	10	100	Yes		
Allanite*	Ce	2	100	Yes	(Ce,Ca,Y,La) <sub>2</sub> (Al,Fe <sub>+3</sub> ) <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)	3.75
	Ca	2	100	Yes		
	Si	5	100	Yes		
Biotite	Mg	5	100	Yes	K(Mg,Fe) <sub>3</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(F,OH) <sub>2</sub>	3.09
	K	2	100	Yes		
	Al	5	100	Yes		
Fe-biotite	Fe	12	100	Yes	K(Mg,Fe) <sub>3</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(F,OH) <sub>2</sub>	3.09
	K	3	100	Yes		
	Al	5	100	Yes		
Fe-oxide	Fe	30	100	Yes	FeO(OH)·nH <sub>2</sub> O	5.15
	S	0	5	No		
Ilmenite	Ti	20	100	Yes	FeTiO <sub>3</sub>	4.72
	Fe	20	100	Yes		
Rutile	Fe	0	10	No	TiO <sub>2</sub>	4.25
	Ti	30	100	Yes		
Chalcopyrite	Cu	10	50	Yes	CuFeS <sub>2</sub>	4.19
	Fe	10	50	Yes		
	S	10	50	Yes		
Pyrite	S	40	60	Yes	FeS <sub>2</sub>	5.01
	Fe	25	50	Yes		
Albite	Na	7	100	Yes	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2.62
	Si	15	100	Yes		
	Al	5	100	Yes		
Epidote	Al	5	15	Yes	Ca <sub>2</sub> (Fe,Al)Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )(Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )O(OH)	3.45
	Ce	0	2	No		
	Ca	10	25	Yes		
	Si	10	18	No		
	Fe	3	30	Yes		
Thorite	Th	30	100	Yes	(Th,U)SiO <sub>4</sub>	5.35
	Si	5	100	Yes		
Fe-Hornblende	Ca	2	15	Yes	(Ca <sub>2</sub> )(Fe <sub>2</sub> +4Al)(AlSi <sub>7</sub> O <sub>22</sub> )(OH) <sub>2</sub>	3.2
	Ce	0	2	No		
	Si	18	50	Yes		
	Al	2	12	Yes		
	Fe	5	30	Yes		
Titanite	Si	10	100	Yes	CaTiSiO <sub>5</sub>	3.48
	Ti	10	100	Yes		
	Ca	10	100	Yes		
Muscovite	Al	10	100	Yes	KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(F,OH) <sub>2</sub>	2.8
	Si	10	100	Yes		
	K	2	10	Yes		

Class	Element	Min	Max	Use Threshold	Chemical formula	Density (g/cm <sup>3</sup> )
K-feldspar	Al	5	100	Yes	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2.56
	Si	20	100	Yes		
	K	10	100	Yes		
Fluorite	F	35	100	Yes	CaF <sub>2</sub>	3.13
Apatite	P	10	100	Yes	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F,Cl,OH)	3.19
	Ca	10	100	Yes		
Chlorite	Si	8	20	Yes	(Mg,Fe) <sub>3</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> · (Mg,Fe) <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub>	2.42
	Al	5	15	Yes		
	Fe	2	35	Yes		
	Mg	2	25	No		
	Ca	0	1	No		
	K	0	2	No		
Pyrrhotite	S	20	45	Yes	Fe <sub>1-x</sub> S	4.61
	Fe	50	70	Yes		
Oxidized Fe-sulphide	Fe	20	60	Yes	FeSOH	4.5
	S	15	45	Yes		
	O	20	50	Yes		
	K	0	2	No		
	Na	0	2	No		
Plagioclase (other than albite)	Si	15	100	Yes	(Na,Ca)(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	2.7
	Al	5	100	Yes		
	Ca	3	100	Yes		
	Na	0	7	No		
	Ce	0	1	No		
Hornblende-Mg	Ca	2	12	Yes	(Ca <sub>2</sub> )(Fe <sup>2+</sup> Al)(AlSi <sub>7</sub> O <sub>22</sub> )(OH) <sub>2</sub>	3.23
	Mg	2	15	Yes		
	Al	2	8	Yes		
	Si	2	100	Yes		
	Fe	0	5	No		
Columbite-(Fe)**	Nb	35	100	Yes	Fe <sup>2+</sup> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	6.3
	Fe	5	100	Yes		
Monazite*	P	5	30	Yes	(Ce,Ln)PO <sub>4</sub>	5.15
	Ce	5	50	Yes		
	Si	0	5	No		
REE-F-carbonates*	F	3.4	17	Yes		4.35 (parisite)
	Ca	0	7	No		
	La	9	28	Yes		
	Ce	18	41	Yes		
Fergusonite-(Y)**	Y	15	100	Yes	YNbO <sub>4</sub>	4.5
	Nb	15	100	Yes		
	Ti	0	2	No		
Pyrochlore**	Ca	2	100	Yes	(Na,Ca) <sub>2</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH,F)	5.3
	Nb	10	100	Yes		

\*REE-bearing minerals

\*\*Nb-REE-U-Th-oxides

Electron probe microanalyses (EPMA) of REE-minerals were made at University of Oulu using JEOL JXA-8200 X-ray microanalyser. Elements Si, Ca, Al, Fe, K, Na, Mn, Ti, P, F, Cl, Zr, Hf, Nb, Th, U, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb were analyzed. The operation conditions were consistent: accelerating voltage 20 kV, electron beam current 1.4–1.6 × 10<sup>-8</sup> nA and diameter 0–10 µm. Cubic zirconia and monazite was used as standards. The analyses of the standard materials showed good correspondence to the standard compositions.

### 3. BOULDER CLASSIFICATION

The boulders were classified by their chemical and mineral composition into types from 1 to 5. Type of each sample is given in the descriptions below. Mineralogical characteristics of each boulder type are given in Table 4.

Table 4. Mineralogical characteristics of boulder types 1-5 from the Otanmäki area.

Boulder type	Main gangue	REE-Nb-U-Th bearing minerals	Macroscopic description	% share of all boulders
1	Quartz	Allanite, Nb-REE-U-Th oxide, REE-fluorocarbonate, zircon, titanite	Grey quartz-rich matrix with dark grey or black allanite bands	50%
2	Quartz, feldspars, magnetite	Allanite, Nb-REE-U-Th oxides, REE-fluorocarbonate, zircon, titanite	Pink or light-colored feldspar and quartz-rich matrix with dark-colored magnetite and allanite-rich bands or disseminated grains	45%
3	Quartz, feldspars, aegirine	Zircon, Nb-REE-U-Th oxides, REE-fluorocarbonate, allanite, monazite, titanite	Pink quartz and feldspar-rich matrix with dark aegirine-arfvedsonite bands or aggregates	2%
4	Quartz, feldspars, magnetite	Thorite, allanite, monazite, REE-fluorocarbonate, zircon	Pink feldspar, quartz and thorite rich matrix with darker bands or aggregates consisting of allanite or magnetite or other darker minerals	2%
5	Fluorite, amphibole, quartz	Allanite, Nb-REE-U-Th oxides, zircon	Banded structure consisting of purple fluorite and greenish to grey amphibole	1%

### 4. WHOLE-ROCK ANALYSES

The results laboratory whole-rock analyses and portable XRF measurements of the boulder samples representing are given in Tables 5 and 6.

Table 5. Representative whole-rock analyses of type 1 boulders from the Otanmäki area (major elements in wt.%, trace element in ppm).

Sample ID	JU-18-L29	JU-18-L113	JU-18-L114	JU-18-L182	JU-18-L191	JU-18-L124	JU-18-L144	JU-18-L218	JU-18-L227	KAKA-18-L4	LER-18-L1
Analysis method	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS
SiO <sub>2</sub> (%)	73.2	72.1	69.2	75.2	73.0	76.5	69.8	70.3	73.4	71.6	64.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.4	6.05	5.16	3.85	5.08	7.65	3.12	5.64	6.41	6.68	7.16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.63	7.92	9.73	1.52	3.19	3.2	5.94	6.82	6.13	4.47	5.58
MgO	0.43	0.21	0.54	0.2	0.34	0.31	0.39	0.34	0.93	0.25	0.13
CaO	5.84	4.62	5.42	6.63	6.54	1.4	0	4.88	3.6	4.37	5.68
Na <sub>2</sub> O	0.13	0.3	0.15	0.19	0.84	0.38	0.87	0.42	0.27	0.34	0.29
K <sub>2</sub> O	0.15	0.4	0.27	1.82	1.44	1.16	0.28	2.21	0.8	2.23	2.54
TiO <sub>2</sub>	0.39	0.51	0.39	0.32	0.38	0.7	0.41	0.48	0.39	0.36	0.16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.03	0.06	0.06	0.02	0.05	0.16	0.04	0.09	0.07	0.12
MnO	0.18	0.13	0.18	0.19	0.1	0.09	0.14	0.16	0.1	0.19	0.29
F	0.04	0.25	0.04	1.41	0.09	0.02	0.04	0.17	0.09	0.1	0.03
LOI	2.3	2.5	2.7	4.4	5.4	2.4	2.4	4	2.9	3.7	6.2
TOT/C	0.21	0.06	0.17	1	1	0.08	0.07	1	0	0.44	1
Total	93.8	94.8	93.9	94.5	96.4	93.9	94.0	95.3	95.0	94.3	92.4
Nb (ppm)	11077	2924	3945	6206	1907	2719	2674	2490	3786	4706	7539
Ta	478	180	334	349	130	197	196	163	222	266	333
Hf	159	519	201	144	346	610	119	430	167	209	184
Zr	3408	21504	10485	7598	14572	25848	6653	18140	9071	10642	9735
Th	1458	594	1819	1259	499	896	1005	705	1446	1474	1622
U	345	198	399	338	126	143	283	165	317	401	417
Y	2668	1224	3201	2193	1068	1576	3926	1488	2415	2562	3450
La	4445	2242	5567	4877	1674	3013	6358	2280	4200	4712	7291
Ce	9670	4766	12016	10569	3418	6501	14671	4863	9360	10244	15972
Pr	1131	540	1407	1217	401	749	1706	555	1088	1184	1831
Nd	4124	1914	5051	4344	1413	2671	6145	1994	3849	4209	6559
Sm	804	358	989	832	260	523	1128	372	754	820	1259
Eu	87	32	95	93	22	53	84	34	68	77	117
Gd	713	287	856	692	211	446	1018	309	636	698	1032
Tb	111	42	133	100	34	67	163	47	97	104	148
Dy	616	236	720	516	214	357	944	278	528	571	778
Ho	109	47	132	90	45	61	182	57	95	105	136
Er	274	133	337	230	137	141	488	166	245	274	340
Tm	33	18	41	29	20	16	61	23	30	35	40
Yb	173	114	217	155	119	92	326	140	162	191	208
Lu	20	16	25	18	16	12	37	19	19	22	23
Ba	95	160	161	1027	102	411	244	422	162	358	541
Ga	30	38	37	25.5	26.5	31	33	35.8	28.6	36	46
Rb	28	27	25	150	123	76	16	190	52	140	82
Sr	260	423	296	198	213	175	449	302	337	288	518



Table 6. Representative whole-rock analyses of samples representing boulder types 2-5 from the Otanmäki area (major elements in wt.%, trace element in ppm).

Element	JIJ-18-L21	JIJ-18-L52	JIJ-18-L159	JIJ-18-L169.2	JIJ-18-L207	JIJ-18-L143	JIJ-18-L197	JIJ-18-L213
Analytical method(s)	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	ICP-OES/-MS	XMET8000	XMET8000	ICP-OES/-MS
Type	2	2	2	2	2	4	4	5
SiO <sub>2</sub>	71.43	75.14	48.19	69.84	64.2	58.11	59.05	49.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.98	7.58	10.34	6.83	8.58	9.55	9.76	4.39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.57	0.75	16.36	9.22	8.52	8.62	5.77	10.05
MgO	0.09	0.14	0.72	0.26	0.43	3.97	2.22	2
CaO	2.99	4.86	8.7	2.57	3.61	3.09	4.68	25.07
Na <sub>2</sub> O	0.4	1.34	1.15	1.38	0.47			0.6
K <sub>2</sub> O	3.06	4.09	5.74	3.78	3.31	7.73	3.95	1.14
TiO <sub>2</sub>	0.49	0.35	1.04	0.73	0.68	0.29	0.23	0.99
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.02	0.18	0.03	0.02	0.83	4.65	0.26
MnO	0.18	0.12	0.31	0.09	0.17	0.12	0.07	0.2
F	0.06	0.71	0.16	0.92	0.18			12.86
LOI	2.4	3.4	1.6	1.2	3.5			2.9
TOT/C	0.39	0.73	0	0	0			0
Total	94.66	97.84	94.33	95.93	93.66	91.46	90.22	97.33
Nb	2987	1041	1855	447	3895	1220	817	1176
Ta	182	77	331	61	256	66	58	22
Hf	486	177	600	603	630	122	72	38
Zr	21413	7634	25111	24098	26193	6509	4434	2056
Th	691	333	511	487	898	9168	7545	787
U	80	68	155	45	225	116	89	106
Y	1780	672	1920	784	1951	1083	1427	2848
La	2326	1224	2832	554	2758	1425	12460	2924
Ce	4891	2225	5580	786	5834	2203	17668	5210
Pr	561	248	630	80	666	292	1342	526
Nd	1994	864	2154	277	2378	498	3804	1728
Sm	389	140	344	65	451			262
Eu	38	16	40	9	42			32
Gd	364	125	289	78	401			278
Tb	59	21	48	16	65			59
Dy	341	137	301	118	381			467
Ho	66	28	67	30	77			113
Er	182	82	201	107	217			353
Tm	23	11	30	18	30			47
Yb	136	66	204	126	178			278
Lu	18	9	30	19	24			40
Ba	307	216	350	125	947	0	32	99
Ga	41	32	45.1	39.2	35.5	44	58	17.7
Rb	218	175	298	444	248	633	360	90
Sr	354	136	209	35	408	32	133	227

## 5. MINERAL CHEMISTRY

### 5.1. Allanite

Allanite was analysed from 12 different samples representing boulder types 1 and 2. In total 36 crystals were analysed. According to microprobe analyses allanite exists in the form allanite-(Ce). Microprobe analyses of allanite-(Ce) in type 1 and 2 boulders are presented in Table 7.

Table 7. Representative microprobe analyses from allanite crystals in boulder types 1 and 2.

Sample ID and boulder type	JIJ-18-L218 Type 1	JIJ-18-L207 Type 2
Elements (wt.%)		
SiO <sub>2</sub>	34.2	35.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.3	20.5
CaO	13.4	16.4
FeOtot	12.7	12.6
LREOtot* (La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	18.1	11.7
HREOtot** (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.7	1.1
REOtot	18.9	12.8
Total	97.4	97.6

\* LREO = light rare earth oxides

\*\* HREO = heavy rare earth oxides

### 5.2. Nb-REE-U-Th-oxides

Nb-REE-U-Th-oxides were analysed from 13 samples representing boulder types 1, 2 and 5. In total 58 analyses were made. Nb-REE-U-Th-oxides were classified into pyrochlore, fergusonite, samarskite, euxenite and aeschynite-group minerals according to three group rule of Ercit (2005). Average compositions of the Nb-REE-Th-U-oxides are shown in Table 8.

Table 8. Average compositions of Nb-REE-U-Th-oxides found in the boulder samples from the Otanmäki area.

Elements (wt.%)	Pyrochlore	Fergusonite-(Y)	Samarskite	Euxenite/ Aeschynite	Columbite- (Fe)
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	46.17	45.66	43.14	35.12	66.79
CaO	17.55	2.84	3.66	3.65	0.70
TiO <sub>2</sub>	5.78	0.18	0.43	14.32	0.49
FeOtot	4.15	1.28	3.32	3.47	14.97
SiO <sub>2</sub>	0.08	0.16	2.15	0.15	1.74
UO <sub>2</sub>	8.05	1.99	2.06	1.62	0.02
ThO <sub>2</sub>	0.03	0.89	1.35	4.10	0.10
F	1.36	0.82	0.38	0.15	0.00
Y <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	26.24	21.28	11.95	1.25
HREOtot* (Y <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.34	35.29	30.48	16.43	4.51
LREOtot** (La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.16	0.85	1.63	13.92	1.03
REOtot	1.50	36.14	32.11	30.35	5.54
Total	85.04	90.83	89.40	93.51	95.58

\* LREO = light rare earth oxides

\*\* HREO = heavy rare earth oxides

### 5.3. REE-fluorocarbonate

REE-fluorocarbonate grains were analysed from 3 samples and in total 11 analyses were made. Average compositions of REE-fluorocarbonate grains are given in Table 9. Carbon was not analysed, which explains the low oxide totals in most of the analyses.

Table 9. Average compositions of REE-fluorocarbonate found from the Otanmäki boulder samples.

Sample ID and type	JIJ-18-L227	JIJ-18-L169.2	JIJ-18-L213
Elements (wt.%)	Type 1	Type 2	Type 5
F	4.25	6.19	1.69
CaO	3.97	5.59	6.48
HREOtot* (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.37	2.01	1.12
LREOtot** (La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ja Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	59.72	61.95	60.05
REOtot	61.09	62.58	61.18
Total	69.31	74.35	69.34

## 6. PETROGRAPHIC DESCRIPTIONS

### 6.1. General

Petrographic observations indicate that most of the mineralized boulders representing types 1–5 show fine-grained and gneissic textures. Major minerals in most of the boulders, including types 1–4, are quartz, allanite and alkali feldspars, excluding the amphibole-fluorite-rich samples representing type 5 boulders. Common minor and accessory minerals are magnetite, calcite, zircon, titanite, Nb-REE-Th-U oxides (e.g., pyrochlore, fergusonite-(Y), columbite-(Fe)), and fluorite. Some boulder representing types 1 and 2 also contain abundant muscovite and biotite and type 4 boulders abundant thorite. In the descriptions below, calcic plagioclase is reported as separate mineral from albite and Nb-REE-U-Th-oxides are a sum of pyrochlore and fergusonite.

## 6.2. JIJ-18-L29 (type 1)



Figure 1. Photograph of sample slab JIJ-18-L29 (dry surface). Scalebar in centimeters.

### *Macroscopic description*

The sample consist of a dark-grey, quartz-allanite-rich gneiss, which is cut by a few granitic veins which are barren with respect to Nb, Zr and REEs.

### *Microtexture*

The rock microstructure is fine-grained and strongly foliated. Quartz is the dominant gangue mineral and it is cut by foliation parallel cracks. Allanite occurs as roundish crystals, which form foliation-parallel bands together with calcite and magnetite. Allanite grains have sharp boundaries against the surrounding minerals. Zircon grains are fine to very fine-grained and either occur as dissemination or locally aggregated clusters. Nb-REE-U-Th oxide grains (e.g., pyrochlore, fergusonite) occur as fine-grained dissemination or grains adjacent to allanite.

### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
65.6	58.96	Quartz
24.8	31.90	Allanite
1.5	2.39	Zircon
1.2	1.42	Epidote
0.9	1.07	Titanite
0.6	1.04	Nb-REE-U-Th-oxides

Area%	Mass%	Mineral
1.1	1.02	Calcite
0.7	0.77	Fe-Hornblende
0.4	0.71	Fe-oxide
0.4	0.44	Apatite
0.3	0.28	Plagioclase

Unclassified 2.4% (243/10057 features)



### 6.3. JIJ-18-L113 (type 1)



Figure 2. Photograph of sample slab JIJ-18-L113 (wet surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Reddish, quartz-rich gneiss with dark bands of allanite and disseminated magnetite grains.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is inequigranular and strongly foliated. Main gangue mineral is quartz. Allanite occurs as fine-grained roundish crystals in aggregates together with fluorite, magnetite and/or calcite. Allanite grains show irregular grain boundaries. Zircon and Nb-REE-U-Th oxide grains are fine to very fine-grained and show dissemination or locally small clusters of such grains, usually adjacent to allanite. Titanite grains are fine-grained and occur as dissemination.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
68.3	62.15	Quartz
9.2	11.98	Allanite
7.1	8.51	Epidote
3.6	4.00	Fe-Hornblende
2.1	3.76	Fe-oxide
2	3.23	Zircon
1.9	1.78	Plagioclase
1.3	1.57	Titanite

Area%	Mass%	Mineral
0.9	0.98	Fluorite
0.7	0.59	Chlorite
0.3	0.55	Nb-REE-U-Th-oxides
0.4	0.38	Calcite
0.1	0.22	Columbite-(Fe)
0.1	0.11	Apatite
0.1	0.10	Muscovite
0.1	0.09	Albite

Unclassified 1.6% (162/10076 features)

#### 6.4. JIJ-18-L114 (type 1)



Figure 3. Photograph of sample slab JIJ-18-L114 (dry surface). Scalebar in centimeters.

##### *Macroscopic description*

Dark grey, quartz-allanite gneiss with granitic veins, barren with respect to Nb, Zr and REEs.

##### *Microtexture*

The rock microstructure is inequigranular and foliated. Main gangue mineral is quartz, but sample is also cut by a barren hornblende-rich vein. Quartz grains are cut by foliation parallel cracks. Allanite occur as medium- to fine-grained elongated aggregates together with very fine-grained zircon, calcite and/or magnetite. Allanite grains show irregular to sharp grain boundaries. Zircon and Nb-REE-U-Th oxide grains are fine to very fine-grained and show dissemination or locally aggregates of such grains, usually adjacent to allanite.

##### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
63.60	59.23	Quartz
20.20	26.93	Allanite
2.10	3.84	Fe-oxide
2.80	3.18	Fe-Hornblende
1.50	2.48	Zircon
0.80	1.39	Nb-REE-U-Th-oxides
0.90	1.11	Titanite

Area%	Mass%	Mineral
0.90	0.87	Calcite
0.30	0.37	Epidote
0.20	0.19	Plagioclase
0.10	0.11	Apatite
0.10	0.11	Fe-biotite
0.10	0.09	K-feldspar
0.10	0.09	Chlorite

Unclassified 6.2% (621/10000 features).

### 6.5. JIJ-18-L124 (type 1)



Figure 4. Photograph of sample slab JIJ-18-L124 (wet surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Moderately foliated quartz-allanite rock. The sample also contains moderate amount of muscovite, which is recognized as light-colored, flaky crystals with naked eye or handlense.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is inequigranular and moderately foliated. Main gangue mineral is quartz. Allanite grains are fine-grained and form elongated aggregates in association with fine-grained zircon, plagioclase, muscovite and/or medium-grained magnetite. Allanite shows irregular grain boundaries against the surrounding quartz grains. Zircon occur as disseminated crystals or clustered aggregates. Nb-REE-U-Th oxide grains are fine to very fine-grained and show dissemination.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
60.1	57.31	Quartz
9.7	13.24	Allanite
10	9.83	Plagioclase
4.9	8.29	Zircon
7.3	7.44	Muscovite
0.7	1.31	Fe-oxide
0.3	0.52	Ilmenite
0.5	0.44	Chlorite

Area%	Mass%	Mineral
0.20	0.39	Nb-REE-U-Th-oxides
0.30	0.34	Fe-biotite
0.3	0.28	K-feldspar
0.20	0.23	Fe-Hornblende
0.10	0.15	Rutile
0.10	0.13	Epidote
0.10	0.12	Apatite

Unclassified 5.1% (356/7026 features)



### 6.6. JIJ-18-L144 (type 1)



Figure 5. Photograph of sample slab JIJ-18-L144 (dry surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Quartz-rich rock with patchy dark allanite aggregates.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is inequigranular and moderately foliated. Sample consists mostly of allanite and quartz. Quartz is cut by cracks with no clear orientation. Allanite shows sharp grain boundaries. Zircon and Nb-REE-U-Th oxide grains occur both as dissemination and fine-grained crystals in aggregates association with allanite.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
42.5	51.57	Allanite
51.7	43.83	Quartz
1.4	1.19	Albite
0.9	1.00	Epidote
0.5	0.52	Fe-Hornblende
0.3	0.45	Zircon

Area%	Mass%	Mineral
0.4	0.45	Titanite
0.4	0.41	Apatite
0.3	0.26	Calcite
0.2	0.17	Plagioclase
0.1	0.15	Nb-REE-U-Th-oxides

Unclassified 1.2% (120/10061 features)



### 6.7. JIJ-18-L182 (type 1)



Figure 6. Photograph of sample slab JIJ-18-L182 (dry surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Dark-grey, quartz-rich rock with foliation-concordant fluorite veinlets.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is foliated, fine-grained and mostly equigranular. Only fluorite occur as medium-grained in some parts of the sample. Quartz is the main gangue mineral. Allanite shows irregular grain boundaries and occurs in clusters with calcite, zircon, and Nb-REE-U-Th oxides. Zircon grains are very fine-grained. Zircon and Nb-REE-U-Th-oxides occur also as dissemination.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
70.8	69.68	Quartz
11.1	10.67	K-feldspar
5.6	7.89	Allanite
4.7	4.78	Calcite
1.1	2.13	Nb-REE-U-Th-oxides
0.9	1.57	Zircon
1.0	1.18	Fluorite
0.8	0.79	Albite
0.5	0.53	Muscovite
0.2	0.24	Apatite
0.2	0.20	Plagioclase (other than albite)
0.1	0.19	Pyrite
0.1	0.16	Chalcopyrite

Unclassified 2.7% (188/7011 features).

### 6.8. JIJ-18-L191 (type 1)



Figure 7. Photograph of sample slab JIJ-18-L191 (dry surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Light-colored, quartz-rich rock with disseminated allanite grains.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is slightly foliated, fine-grained and mostly equigranular. Main gangue minerals are quartz and calcite. Allanite is disseminated throughout the sample as fine-grained crystals with irregular interfaces in association with calcite. Zircon crystal size ranges from fine-grained to very fine-grained and such crystals occur as aggregates or dissemination, often in association with allanite. Nb-REE-U-Th oxide grains occur as fine-grained dissemination.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
62	60.53	Quartz
8.7	8.78	Calcite
4.7	6.57	Allanite
6.4	6.10	K-feldspar
6	5.86	Albite
1.9	3.29	Zircon
2.1	2.42	Fe-biotite
1.1	1.41	Epidote
1	1.19	Fe-Hornblende

Area%	Mass%	Mineral
0.9	1.17	Titanite
0.7	0.70	Plagioclase
0.3	0.58	Fe-oxide
0.3	0.54	Nb-REE-U-Th-oxides
0.2	0.37	Pyrite
0.3	0.27	Chlorite
0.1	0.17	Oxid. Fe-sulphide
0.1	0.12	Fluorite
0.1	0.10	Muscovite

Unclassified 3.1% (308/10065 features).

### 6.9. JIJ-18-L218 (type 1)



Figure 8. Photograph of sample slab JIJ-18-L218 (wet surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Dark-grey, quartz-biotite-allanite-rich gneiss.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is foliated and inequigranular. Main gangue minerals are quartz and biotite. Allanite grains are fine-grained and occur as in bands with calcite, zircon, and biotite. Allanite shows irregular grain boundaries. Zircon grains are very fine-grained and occur as dissemination or clusters. Nb-REE-U-Th oxide grains are fine-grained and occur as dissemination or as solitary grains adjacent to allanite.

#### *Modal composition*

Area	Mass%	Mineral
57.7	55.56	Quartz
12.1	13.74	Fe-biotite
6.3	8.68	Allanite
5.4	5.38	Calcite
5.6	5.27	K-feldspar
2.5	4.27	Zircon
2.3	2.21	Albite
1.2	1.41	Fe-Hornblende

Area	Mass%	Mineral
0.6	0.77	Titanite
0.6	0.76	Epidote
0.6	0.60	Plagioclase
0.3	0.52	Nb-REE-U-Th-oxides
0.2	0.38	Fe-oxide
0.2	0.23	Fluorite
0.1	0.12	Apatite
0.1	0.10	Muscovite

Unclassified 3.7% (377/10056 features)



### 6.10. JIJ-18-L227 (type 1)



Figure 9. Photograph of sample slab JIJ-18-L227 (dry surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Quartz-allanite gneiss with orange REE-fluorocarbonate vein.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is inequigranular and foliated. Main gangue mineral is fine-grained quartz, which is cut by foliation parallel cracks. Allanite grains are fine-grained and show irregular grain boundaries. Allanite grains occur in bands and dissemination, usually adjacent to biotite and zircon. Zircon grains are very fine-grained and occur as dissemination or occasionally in clusters. Nb-REE-U-Th-oxide grain are fine-grained and disseminated. REE-fluorocarbonate occur in veins.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
64.7	60.03	Quartz
15.7	20.85	Allanite
6.1	6.67	Fe-biotite
3.2	3.63	Fe-Hornblende
1.1	1.81	Zircon
1.3	1.59	Epidote
0.7	1.26	Nb-REE-U-Th-oxides
1.2	1.15	Plagioclase
1.1	1.02	Albite

Area%	Mass%	Mineral
0.6	0.74	Titanite
0.2	0.36	Fe-oxide
0.2	0.23	Apatite
0.2	0.20	Muscovite
0.2	0.17	Chlorite
0.1	0.13	REE-fluorocarbonate
0.1	0.11	Biotite
0.1	0.10	Calcite
0.1	0.09	K-feldspar

Unclassified 2.6% (263/10070 features)



### 6.11. LER-18-L1 (type 1)



Figure 10. Photograph of sample slab LER-18-L1 (dry surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Dark-grey, quartz-allanite gneiss with a brownish-grey weathered surface.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is inequigranular and foliated. Quartz is the dominant gangue mineral and cut by foliation parallel cracks. Allanite grains are fine-grained and occur in bands with calcite and zircon. Allanite shows irregular grain boundaries. Zircon and Nb-REE-Th-U oxide grains are very fine-grained to fine-grained and occur as dissemination, often with allanite.

#### *Modal composition*

Area	Mass%	Mineral
46.50	45.57	Quartz
17.50	24.55	Allanite
14.50	13.88	K-feldspar
5.20	5.27	Calcite
1.60	2.78	Zircon
1.1	2.00	Nb-REE-U-Th-oxides
1.20	1.18	Albite
0.60	1.12	Pyrite
1.00	1.05	Muscovite

Area	Mass%	Mineral
0.50	0.96	Fe-oxide
0.40	0.48	Apatite
0.30	0.36	Fe-Hornblende
0.20	0.34	Pyrrhotite
0.10	0.24	Columbite-(Fe)
0.10	0.17	Oxid. Fe-sulphide
0.10	0.12	Fe-biotite
0.10	0.10	Plagioclase

Unclassified 6.4% (645/10068 features)

### 6.12. KAKA-18-L4 (type 1)



Figure 11. Photograph of sample slab KAKA-18-L4 (wet surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Gneissic rock composed of lighter quartz-feldspar-rich and darker allanite-rich bands.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is inequigranular and foliated. Main gangue minerals are fine-grained quartz and potassium feldspar. The gangue minerals are cut by foliation parallel cracks. Allanite grains are fine-grained and form banded clusters with calcite and zircon. Allanite shows irregular grain boundaries. Zircon and Nb-REE-Th-U oxide grains are very fine-grained to fine-grained and occur as dissemination.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
55.80	52.27	Quartz
16.30	21.85	Allanite
13.90	12.72	K-feldspar
1.3	2.29	Nb-REE-U-Th-oxides
1.30	2.16	Zircon
1.60	1.77	Biotite
1.30	1.26	Calcite
1.20	1.12	Albite
0.70	0.77	Fe-biotite

Area%	Mass%	Mineral
0.40	0.74	Fe-oxide
0.60	0.69	Fe-Hornblende
0.50	0.62	Titanite
0.60	0.60	Muscovite
0.20	0.45	Columbite-(Fe)
0.30	0.37	Epidote
0.20	0.19	Plagioclase
0.10	0.11	Apatite

Unclassified 3.5% (350/10065 features)

### 6.19. JIJ-18-L21 (type 2)



Fig. 12. Photograph of sample slab JIJ-18-L21 (wet surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

A gneissic rock composed of light-colored quartz and feldspar and dark bands of allanite and magnetite.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is foliated and inequigranular. In some parts, the texture resembles a porphyritic texture, as the rock consist of fine-grained quartz-feldspar and medium-grained magnetite crystals. Roundish, fine-grained allanite crystals usually occur around subhedral magnetite, but also as dissemination. Allanite shows irregular grain boundaries. Zircon and Nb-REE-Th-U oxide grains are very fine to fine-grained and occur as dissemination, often with allanite.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
60.8	57.83	Quartz
14	13.01	K-feldspar
8.6	11.71	Allanite
2.6	4.39	Zircon
2.3	4.30	Fe-oxide
2.9	2.85	Calcite
1.3	1.32	Muscovite
1.0	0.95	Albite
0.6	0.76	Titanite

Area%	Mass%	Mineral
0.7	0.69	Plagioclase
0.3	0.52	Nb-REE-U-Th-oxides
0.4	0.46	Fe-Hornblende
0.4	0.45	Fe-biotite
0.1	0.23	Columbite-(Fe)
0.1	0.17	Ilmenite
0.1	0.13	Epidote
0.1	0.12	Apatite
0.1	0.11	Fluorite

Unclassified 3,4% (346/10075 features)



### 6.20. JIJ-18-L52 (type 2)



Figure 13. Photograph of sample slab JIJ-18-L52 (wet surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Light-colored, quartz- and feldspar-rich gneiss with fluorite veinlets.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is inequigranular and weakly foliated. Main gangue minerals are quartz, potassium feldspar and albite, which occur as fine- to medium-grained, anhedral to subhedral crystals. Allanite and zircon grains are fine- to very fine-grained and occur together as scattered and elongated aggregates. Allanite grains shows irregular grain boundaries. REE-fluorocarbonate grains are fine-grained and occur as dissemination, usually adjacent to fluorite. Fluorite occur as medium-grained veinlets. Nb-REE-U-Th oxide grains are fine-grained and occur as dissemination.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
49.4	52.45	Quartz
22	22.82	K-feldspar
7.5	7.96	Albite
5.9	6.48	Calcite
1.8	2.74	Allanite
1.3	2.45	Zircon
1.5	1.90	Fluorite
0.6	0.85	Titanite

Area%	Mass%	Mineral
0.7	0.79	Muscovite
0.2	0.36	Nb-REE-U-Th-oxides
0.3	0.33	Plagioclase
0.2	0.26	Hornblende-Mg
0.2	0.26	Fe-Hornblende
0.1	0.13	Apatite
0.1	0.12	REE-fluorocarbonate
0.1	0.10	Chlorite

Unclassified 8.05% (921/11440 features)



### 6.21. JIJ-18-L159 (type 2)



Figure 14. Photograph of sample slab JIJ-18-L159 (wet surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Alkali feldspar- and quartz-rich gneiss with centimetre-thick allanite bands.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is foliated and inequigranular. Main gangue minerals are potassium feldspar, albite and quartz. Allanite crystals occur in bands with calcite and magnetite. Zircon and titanite grains are fine-grained and occur as abundant dissemination or in clusters with allanite.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
46.8	45.84	K-feldspar
8.6	12.34	Allanite
10.7	10.73	Quartz
9.6	9.62	Albite
4.4	7.83	Zircon
3.7	4.93	Titanite
4.5	4.67	Calcite

Area%	Mass%	Mineral
1.1	2.17	Fe-oxide
0.6	0.73	Fe-Hornblende
0.4	0.49	Apatite
0.3	0.31	Plagioclase
0.1	0.12	Hornblende-Mg
0.1	0.12	Fe-biotite
0.1	0.11	Muscovite

Unclassified 8.2% (823/10000 features)

### 6.22. JIJ-18-169.2 (type 2)



Figure 15. Photograph of sample slab JIJ-18-L169.2 (wet surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Quartz-feldspar gneiss with dark bands composed of magnetite.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is foliated and inequigranular. Main gangue minerals are quartz and feldspars. Allanite grains are fine-grained and occur as dissemination. REE-fluorocarbonate grains are fine-grained and occur as clusters. Titanite grains occur as dissemination and in aggregates with magnetite. Zircon grains occur as fine-grained dissemination and occasionally in clusters with fluorite.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
49.70	48.33	Quartz
19.30	18.34	K-feldspar
16.40	15.95	Albite
3.30	6.31	Fe-oxide
2.80	4.83	Zircon
1.50	1.94	Titanite
1.10	1.28	Fluorite
1.00	0.90	Chlorite

Area%	Mass%	Mineral
0.70	0.70	Calcite
0.30	0.34	Fe-biotite
0.20	0.28	Allanite
0.20	0.23	Biotite
0.14	0.23	REE-fluorocarbonate
0.10	0.12	Hornblende-Mg
0.10	0.12	Fe-Hornblende
0.10	0.10	Plagioclase

Unclassified 2.96% (296/10017 features)

### 6.23. JIJ-18-L207 (type 2)



Figure 16. Photograph of sample slab JIJ-18-L207 (wet surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Strongly foliated, quartz- and allanite-rich gneiss consisting of dark and light-colored bands.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is strongly foliated, equigranular and fine-grained. Main gangue mineral is quartz, which forms light-colored bands with clusters of zircon. Dark bands consist of allanite, zircon, hornblende, and biotite. Biotite grains show wavy shape and are strongly foliated. Allanite grains show irregular grain boundaries and are usually associated with calcite and zircon. Zircon and Nb-REE-Th-U oxide grains are very fine to fine-grained and occur as dissemination.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
48.5	45.16	Quartz
10.6	14.13	Allanite
12	13.18	Fe-biotite
3.7	6.11	Zircon
6	5.46	K-feldspar
3.6	4.09	Fe-Hornblende
3.3	3.18	Calcite
2	2.45	Epidote

Area%	Mass%	Mineral
1.9	1.82	Plagioclase
0.8	1.46	Fe-oxide
1	1.24	Titanite
0.6	0.56	Albite
0.3	0.51	Nb-REE-U-Th-oxides
0.1	0.22	Columbite-(Fe)
0.2	0.22	Fluorite
0.2	0.20	Muscovite

Unclassified 4.3% (433/10000 features)



#### 6.24. JIJ-18-L143 (type 4)



Figure 17. Photograph of sample slab JIJ-18-L143 (wet surface). Scalebar in centimeters.

##### *Macroscopic description*

Banded, potassium feldspar and quartz rich rock with dark magnetite-thorite bands.

##### *Microtexture*

The rock microstructure is inequigranular and banded with light-colored bands of potassium feldspar and quartz and dark-colored bands of magnetite, quartz and thorite. There are foliation parallel cracks going through quartz grains in magnetite-thorite bands, but such cracks do not intersect magnetite or thorite grains. Zircon occurs as scattered, fine-grained solitary crystals. Minor amounts of allanite occur as dissemination. REE-fluorocarbonates occur with magnetite and allanite in single magnetite-quartz rich band. Fractures and grain boundaries of quartz and feldspars are also colored reddish by Fe-hydroxide.

##### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
31.7	29.78	K-feldspar
11.9	22.49	Fe-oxide
17.4	16.73	Quartz
6	11.78	Thorite
9	8.65	Albite
1.3	2.22	Zircon
1.6	1.84	Fluorite
1.8	1.60	Chlorite
1	1.13	Biotite

Area%	Mass%	Mineral
0.8	1.10	Allanite
0.9	1.02	Fe-biotite
0.7	0.70	Calcite
0.1	0.44	REE-fluorocarbonate
0.2	0.24	Hornblende-Mg
0.2	0.23	Fe-Hornblende
0.2	0.23	Apatite
0.1	0.16	Rutile
0.1	0.10	Plagioclase

Unclassified 15.1% (1506/10000 features). Most of the unclassified data is very Th- and Fe-rich (>5 wt%).



### 6.25. JIJ-18-L197 (type 4)



Figure 18. Photograph of sample slab JIJ-18-L197 (wet surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Quartz-feldspar-rich gneiss with allanite bands and abundant thorite.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is inequigranular with gneissic banding. Light-colored bands consist of albite, potassium feldspar, and quartz and darker bands consist of allanite, thorite, and quartz. In darker bands quartz has foliation parallel cracks. Allanite grains form foliated aggregates and shows sharp grain boundaries. Monazite grains are found as fine-grained crystals with allanite. In the bands where monazite is present, feldspars are also abundant. REE-fluorocarbonate is fine-grained and occurs in bands. Zircon grains are fine-grained and occur as dissemination or occasionally forms aggregates.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
27.5	26.29	Albite
20.7	19.79	Quartz
12.9	17.65	Allanite
13.4	12.52	K-feldspar
5.2	6.05	Apatite
2.1	4.10	Thorite
2.22	3.52	REE-fluorocarbonate
3	2.65	Chlorite
1.2	2.26	Monazite

Area%	Mass%	Mineral
1.00	1.88	Fe-oxide
1.10	1.87	Zircon
0.20	0.37	Pyrite
0.20	0.33	Oxid. Fe-sulphide
0.10	0.11	Fe-biotite
0.10	0.10	Muscovite
0.10	0.10	Calcite
0.10	0.10	Plagioclase

Unclassified 10.63% (1063/10000 features)

### 6.26. JIJ-18-L213 (type 5)



Figure 19. Photograph of sample slab JIJ-18-L213 (dry surface). Scalebar in centimeters.

#### *Macroscopic description*

Gneissic structure with greenish to grey amphibole and purple to dark blue fluorite bands.

#### *Microtexture*

The rock microstructure is inequigranular. Anhedral fluorite forms the groundmass of the sample. Fluorite and amphibole occur as medium-grained crystals. The grain size of allanite and quartz ranges from fine- to medium-grained. Roundish allanite crystals occur as solitary grains or in aggregates in association with fluorite. Titanite, zircon and Nb-REE-Th-U oxide grains are fine-grained and occur as dissemination.

#### *Modal composition*

Area%	Mass%	Mineral
38	40.28	Fluorite
16	17.34	Ferropargasite
15.6	13.84	Quartz
5.8	7.37	Allanite
4.4	4.04	Calcite
4.1	3.64	Albite
1.9	3.31	Fe-oxide
2.8	2.93	Biotite
2	2.36	Titanite

Area%	Mass%	Mineral
1.9	1.65	K-feldspar
0.9	0.97	Apatite
0.5	0.58	Epidote
0.3	0.47	Zircon
0.5	0.46	Plagioclase
0.3	0.46	Nb-REE-U-Th-oxides
0.1	0.11	Hornblende-Mg
0.1	0.10	Fe-biotite
0.1	0.08	Chlorite

Unclassified 10.63% (1063/10000 features)

**Liite 9. Mikroanalysaattorin standardianalyysien tulokset ja standardikoostumukset.**

Tunnus	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ThO <sub>2</sub>
std-monatzite-1	15.33	36.80	5.06	0.53	10.61	28.02	3.84
std-monatzite-2	15.14	36.23	4.97	0.53	10.56	28.48	3.80
std-monatzite-3	15.34	36.44	5.22	0.59	10.58	28.24	3.92
std-monatzite-4	15.44	36.24	4.92	0.59	10.51	28.84	4.05
std-monatzite-5	15.65	36.88	4.99	0.51	10.46	28.77	2.38
std-monazite1	15.03	36.07	5.16	0.55	10.36	28.56	4.08
std-monazite2	14.82	35.84	4.73	0.71	10.25	28.78	3.96
std-monazite1	15.23	36.71	5.39	0.61	11.11	28.80	4.18
std-monazite2	15.40	35.98	5.07	0.56	10.63	28.38	4.04
std-monazite3	14.92	36.47	5.11	0.62	10.79	28.58	3.35
std-monazite4	15.21	36.20	5.04	0.59	10.50	28.62	3.79
std-monazite1	15.03	36.14	4.77	0.51	10.58	27.72	4.64
std-monazite2	15.25	36.39	4.75	0.54	10.42	27.66	4.58
std-monazite-1	15.90	36.97	5.02	0.53	10.42	28.38	4.13
std-monazite-2	15.25	36.60	4.93	0.59	10.35	28.26	3.90
std-monazite-3	15.09	35.87	4.85	0.59	10.68	28.23	3.83
<b>Vertailuarvot</b>	<b>15.13</b>	<b>36.08</b>	<b>4.92</b>	<b>0.56</b>	<b>10.15</b>	<b>27.73</b>	<b>4.32</b>

Tunnus	ZrO <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	HfO <sub>2</sub>
std-cubiczircon-1	80.77	18.01	0.00
std-cubiczircon-1	80.50	17.22	0.02
std-cubiczircon-3	78.23	18.08	0.01
std-cubiczircon-4	80.10	17.63	0.00
std-cubiczircon-5	82.48	17.40	0.00
std-cubiczircon-5	81.22	17.93	0.00
std-cubiczircon-6	80.60	18.14	0.00
std-cubiczircon1	81.96	17.92	1.79
std-cubiczircon2	81.95	17.56	1.76
std-cubicZr1	80.94	17.60	1.81
std-cubicZr2	81.20	17.41	1.74
std-cubicZr3	80.53	18.42	1.79
std-cubicZr4	80.87	17.39	1.68
std-cubic-zr1	81.41	17.55	1.73
std-cubic-zr2	80.20	17.26	1.76
std-cubic-zirconia-1	83.14	17.88	1.65
std-cubic-zirconia-2	80.85	17.11	1.69
std-cubic-zirconia-3	81.70	17.35	1.64
<b>Vertailuarvot</b>	<b>79.93</b>	<b>18.25</b>	<b>1.78</b>

**Liite 10. EPMA-tulokset. Allaniitti.**

Näytetunnus	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO
LER-AII1	3.668	10.853	17.799	1.643	34.517	13.237	3.316	13.597
LER-AII2	3.708	10.014	17.922	1.522	34.182	13.235	3.213	13.373
JII-L182-AII1	5.722	14.384	17.947	1.938	34.276	10.695	3.463	11.593
JII-L182-AII2	6.323	13.232	17.502	1.861	33.505	10.705	3.545	11.175
JII-L182-AII3	5.508	12.023	18.257	1.699	35.904	10.091	3.264	8.163
JII-L182-AII4	5.615	12.288	17.389	1.736	34.228	9.327	3.323	8.282
JII-L124-AII1	3.894	10.46	17.096	1.627	39.992	7.008	3.827	5.366
JII-L124-AII2	3.909	10.344	19.579	1.618	34.144	11.524	3.516	11.691
JII-L124-AII3	3.589	10.136	19.381	1.595	34.285	11.581	3.61	11.639
JII-L191-AII1	3.976	10.17	18.496	1.592	34.599	13.376	3.559	14.719
JII-L191-AII2	3.847	9.766	17.93	1.456	33.95	13.938	3.35	13.911
JII-L191-AII3	3.111	8.827	18.615	1.478	34.952	14.579	3.051	13.405
JII-L218-AII1	3.166	9.194	17.63	1.491	34.954	13.675	3.441	11.885
JII-L218-AII2	3.478	9.388	18.804	1.356	34.191	13.476	3.189	12.831
JII-L218-AII3	3.667	9.499	18.364	1.429	33.906	13.263	3.25	13.306
JII-L218-AII4	3.761	9.42	18.564	1.349	33.91	13.384	3.231	12.655
JII-L114-AII1	2.337	6.416	18.313	0.845	34.696	16.108	2.406	14.605
JII-L114-AII2	2.136	6.408	18.306	1.092	35.182	15.968	2.377	14.32
JII-L114-AII3	1.568	4.487	19.465	0.78	36.192	17.665	1.658	14.106
JII-L207-AII1	2.573	6.763	19.818	1.11	34.776	15.431	2.499	12.734
JII-L207-AII2	2.111	5.677	20.749	0.898	35.423	16.452	2.099	12.486
JII-L207-AII3	1.836	5.357	20.882	0.784	35.378	17.076	1.864	12.232
JII-L207-AII4	2.474	6.266	20.617	1.028	35.466	16.484	2.08	12.497
KAKA-L4-AII1	2.981	8.401	18.821	1.302	36.682	15.804	2.993	15.472
KAKA-L4-AII2	2.855	7.804	18.051	1.275	35.03	14.915	2.618	14.718
KAKA-L4-AII3	2.378	6.821	18.325	0.824	36.385	16.628	2.025	15.506
JII-L21-AII1	2.332	6.655	19.17	1.01	35.13	15.334	2.098	13.928
JII-L21-AII2	3.061	8.745	18.33	1.154	34.289	13.963	2.917	14.126
JII-L21-AII3	2.326	5.989	19.252	0.896	35.592	16.345	1.893	13.352
JII-L159-AII1	3.658	8.905	15.244	1.309	33.903	14.13	2.986	16.685
JII-L159-AII2	3.36	7.654	16.068	1.073	34.606	15.4	2.295	16.621
JII-L159-AII3	2.848	6.938	16.702	1.082	35.013	15.664	2.242	16.407
JII-L159-AII4	4.149	9.379	13.143	1.541	38.013	8.43	2.852	9.794
JII-L144-AIIT1	4.76	15.822	11.389	2.221	31.648	9.527	4.441	18.291
JII-L144-AIIT2	5.717	15.83	10.949	2.185	31	9.612	3.997	18.367
JII-L144-AIIT3	3.826	13.885	12.363	2.446	32.585	10.107	5.652	18.239
JII-L144-AIIV1	3.237	19.15	0	4.858	22.361	13.324	14.78	0
JII-L144-AIIV2	3.256	19.398	0	5.046	22.547	14.024	14.387	0
JII-L144-AIIV3	2.358	16.475	0.013	4.673	22.903	13.382	15.187	0
JII-18-L159.1-AII1	3.023	7.799	15.533		33.906	14.439	2.338	17.164
JII-18-L159.1-AII2	4.149	10.021	14.766		33.429	13.26	2.686	16.825
JII-18-L159.1-AII3	3.445	7.352	15.708		34.503	15.141	2.212	16.084
JII-18-L159.1-AII4	3.727	9.935	14.401		33.576	13.049	2.756	17.561
JII-18-L159.1-AII5	4.179	9.71	14.448		32.972	12.916	2.845	17.572
JII-18-L159.1-AII6	3.781	7.718	16.132		34.337	14.986	2.33	16.553
JII-18-L159.1-AII7	3.288	8.383	16.149		34.798	14.135	2.596	16.43



## Zirkoni

Näytetunnus	ZrO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	FeO	HfO <sub>2</sub>
JY-L29-Zr1	65.576	35.447	0.044	0.044
JY-L29-Zr2	64.802	35.343	0.146	0.146
JY-L114-Zr1	65.837	35.621	0.177	0.177
JY-L114-Zr2	65.638	35.45	0.237	0.237
JY-L52-Zr1	64.942	35.594	0.092	0.092
JY-L52-Zr2	51.672	43.555	3.14	3.14
JY-L124-Zr1	65.138	35.581	0.197	0.197
JY-L124-Zr2	57.827	40.993	0.541	0.541
JY-L124-Zr3	66.449	34.606	0.119	0.119
JY-L191-Zr1	65.837	34.613	0.196	0.196
JY-L191-Zr3	64.57	35.141	0.071	0.071
JY-L218-Zr1	65.673	35.515	0.33	0.33
JY-L218-Zr2	64.05	35.409	0.14	0.14
JY-L169.2-Zr1	61.156	33.215	0.326	0.326
JY-L169.2-Zr2	59.975	33.446	0.67	0.67
JY-L169.2-Zr3	65.349	34.931	0.296	0.296
JY-L207-Zr1	63.759	34.956	0.205	0.205
JY-L207-Zr2	48.319	36.394	3.307	3.307
JY-L207-Zr3	64.974	35.06	0.322	0.322
JY-L113-Zr1	64.381	35.428	0.01	0.01
JY-L113-Zr2	64.634	35.676	0.038	0.038
JY-L113-Zr3	64.576	35.431	0.011	0.011
JY-L113-Zr4	67.825	37.237	0.297	0.297
JY-L21-Zr2	63.579	35.083	0.214	0.214
JY-L159-Zr1	62.472	33.675	0.018	0.018
JY-L159-Zr2	63.349	33.275	0.048	0.048
JY-L159-Zr3	62.888	34.057	0.178	0.178
JY-L159-Zr4	65.09	35.244	0.077	0.077
JY-L1227-Zr1	59.231	32.168	0.464	0.464
JY-L1227-Zr2	64.835	35.104	0.127	0.127
JY-L1227-Zr3	54.822	32.716	1.754	1.754
JY-18-L159.1-Zr	61.114	32.249	0.166	0.166

## REE-fluorokarbonaatti

Sample	JU- L213- REE1	JU- L52- REE1	JU- L52- REE2	JU- L169, 2- REE1	JU- L169, 2- REE2	JU- L169, 2- LaCe 1	JU- L169, 2- LaCe 2	JU- L169, 2- LaCe 3	JU- L169, 2- LaCe 4	JU- L169, 2- LaCe 5	JU- L169, 2- LaCe 6	JU- L122 7- REE1	JU- L122 7- REE2	JU- L122 7- REE3	JU- L122 7- REE4	JU- L122 7- REE5	JU- L122 7- REE6
F	1.69	6.53	5.85	5.74	5.89	6.09	6.92	4.18	6.44	3.52	5.86	4.76	4.45	6.30	4.94	4.57	0.51
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.62	11.24	8.24	14.67	23.65	22.34	18.11	14.50	16.13	13.29	22.13	9.42	10.83	11.02	10.11	9.00	16.89
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.85	27.14	20.45	18.76	30.07	31.53	25.89	19.69	22.49	19.60	30.12	29.57	32.59	32.79	32.03	28.94	26.88
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.02	4.07	3.23	2.35	3.08	3.42	3.08	2.32	2.52	2.13	3.11	5.01	5.19	5.08	5.14	4.73	3.45
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.81	9.36	7.86	5.26	6.42	6.67	6.21	4.72	5.60	4.39	6.77	11.74	12.38	12.40	12.55	10.94	7.70
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.76	1.38	1.25	1.19	1.29	1.17	1.26	0.98	1.05	0.85	1.50	1.98	2.12	2.30	2.31	2.20	1.05
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.91	1.44	1.84	2.01	1.48	0.92	1.68	1.19	1.18	0.99	1.49	4.29	4.09	3.94	4.68	4.13	0.19
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.21	0.50	0.45	0.60	0.55	0.41	0.50	0.39	0.48	0.35	0.64	1.22	1.19	1.23	1.20	0.95	0.21
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.14	0.18	0.05	0.06	0.12	0.22	0.11	0.06	0.08	0.44	0.46	0.38	0.48	0.44	0.00
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.01	0.02	0.06	0.00	0.01	0.04	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	6.48	4.86	5.27	7.40	4.64	5.58	5.51	4.30	5.13	3.76	6.62	3.15	3.64	2.65	3.45	3.33	7.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.31	5.56	5.98	3.58	0.29	0.67	2.70	5.75	5.03	11.23	0.22	1.97	1.07	0.94	1.32	2.07	1.69
FeO	1.55	3.47	5.33	7.11	0.22	1.40	3.55	9.20	5.07	7.98	0.46	2.39	0.70	1.88	0.54	2.50	0.93
SiO <sub>2</sub>	4.78	11.38	14.28	11.21	1.08	1.06	6.16	14.09	10.82	21.45	0.48	4.06	2.40	2.92	3.28	5.05	1.88
TiO <sub>2</sub>	0.17	0.35	0.24	0.01	0.12	0.03	0.68	0.17	1.32	0.10	0.08	0.05	0.00	0.07	0.03	0.03	0.00
ThO <sub>2</sub>	1.15	2.19	2.47	3.84	0.67	1.18	3.68	2.05	1.88	1.38	1.05	0.56	0.52	0.45	0.57	0.58	0.05
Total	78.30	89.48	82.87	83.92	79.54	82.52	86.07	83.79	85.27	91.13	80.60	80.62	81.62	84.34	82.62	79.45	69.05

## Nb-REE-Th-U-oksidiit, fergusoniiitti

Näyte	JU- L114- NbY1	JU- L114- NbY2	JU- L1227 -NbY1	JU- L191- NbY1	JU- L191- NbY3	JU- L191- NbY4	JU- L207- NbY1	JU- L213- Fe1	JU- L213- Fe2	JU- L213- Fe3	JU- L213- Fe4	JU- L218- NbYC	JU- L218- NbYC	JU- L29- NbY2	JU- L52- Fe2	KAK A-L4- NbY1	KAK A-L4- NbY2	LER- Nb3
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	47.39	46.69	44.64	44.56	45.30	45.71	44.97	44.48	45.22	44.33	44.24	44.81	46.52	46.08	44.18	47.97	47.38	47.41
TiO <sub>2</sub>	0.18	0.03	0.18	0.03	0.03	0.08	0.08	0.50	0.60	0.57	0.36	0.13	0.13	0.13	0.19	0.06	0.03	0.00
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.64	25.98	27.33	25.16	26.30	25.07	26.18	25.82	27.56	26.49	26.24	24.72	25.48	26.22	25.39	27.76	27.47	25.44
UO <sub>2</sub>	1.52	4.46	2.34	0.80	0.77	3.64	1.51	2.06	1.70	2.45	2.07	2.82	2.09	2.18	0.80	1.08	1.42	2.20
ThO <sub>2</sub>	0.35	0.47	0.58	1.23	1.21	0.23	0.59	0.01	0.16	0.14	0.09	1.34	1.80	0.21	2.91	1.42	1.80	1.43
CaO	1.81	2.52	3.48	3.28	2.15	3.57	2.84	2.92	2.22	2.96	2.41	4.13	2.85	2.80	2.70	3.10	3.13	2.21
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.05	0.11	0.03	0.02	0.00	0.09	0.00	0.06	0.04	0.10	0.00	0.00	0.00
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11	0.11	0.13	0.24	0.18	0.00	0.21	0.03	0.02	0.00	0.11	0.14	0.39	0.14	0.26	0.20	0.12	0.16
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.22	0.34	0.00	0.07	0.00	0.07	0.11
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	0.19	0.20	0.38	0.34	0.12	0.16	0.06	0.00	0.07	0.11	0.46	0.85	0.08	0.63	0.37	0.37	0.49
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19	0.12	0.26	0.41	0.41	0.20	0.38	0.00	0.00	0.12	0.02	0.61	0.72	0.06	0.81	0.42	0.48	0.72
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.32	0.00	0.19	0.21	0.00	1.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	1.08	0.00	1.74	0.46	0.99	2.33
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.16	4.44	3.76	4.07	4.00	3.25	4.19	3.28	3.53	3.16	3.56	3.74	4.20	4.57	4.44	4.31	4.33	4.72
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.71	1.93	2.18	2.50	2.62	3.16	1.59	4.01	3.86	3.87	3.41	1.95	1.80	2.99	1.39	2.10	1.73	0.98
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.12	1.79	2.68	3.08	3.11	1.56	4.14	3.90	3.99	3.65	2.15	1.68	0.01	1.49	2.06	1.80	0.17
Cl	0.22	0.24	0.31	0.24	0.29	0.29	0.07	0.35	0.40	0.38	0.39	0.35	0.47	0.28	0.22	0.36	0.38	0.32
F	0.47	0.47	0.81	1.03	0.89	1.00	0.78	0.89	0.92	1.05	0.86	1.03	0.59	0.63	1.36	0.89	0.69	0.47
FeO	0.63	0.45	1.54	1.18	1.08	1.58	1.92	1.69	1.45	2.17	2.09	1.98	1.32	0.82	0.49	0.68	1.02	1.04
SiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	1.48	0.42	0.00	0.10	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00	0.00	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
MnO	0.58	0.43	0.20	0.29	0.30	0.33	0.08	0.80	0.24	0.66	0.50	0.30	0.25	0.55	0.87	0.52	0.58	0.66
ZrO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2.41	1.62	0.03	0.14	0.19	0.12	0.04	0.24	0.15	0.13	0.11	0.08	0.07	2.37	0.02	0.18	0.10	0.78
Total	86.26	87.35	87.04	85.50	86.70	88.18	85.52	87.35	88.93	88.16	86.36	87.89	89.98	85.49	87.08	91.30	91.13	88.36

Ngtype	JU- L124- NbYT11	JU- L124- NbYT12	JU- L124- NbYT13	JU- L182- NbThNd	JU- L182- NbThNd	JU- L182- NbTiCa1	JU- L182- NbTiCa2	JU-L21- NbFe1	LER- Co11	LER- Co12	JU- L1227- NbCa1	JU- L1227- NbCa2	JU- L1227- NbCa3	JU- L207- NbO1	JU-L21- NbCa1	JU-L29- NbCa1	JU- L159- NbU1	JU- L159- NbU2	JU- L191- NbYCa1	JU- L191- NbYCa2	JU-L29- NbCa2
Mineral	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average	Enrichment / Average
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34.76	29.24	37.52	40.06	39.68	30.45	34.09	70.45	69.22	60.70	70.04	72.32	72.36	67.26	68.03	75.92	42.17	39.78	51.06	51.77	46.08
TiO <sub>2</sub>	19.38	17.91	23.14	0.34	0.55	20.82	18.11	1.48	0.00	0.00	2.67	1.85	1.53	4.07	3.57	0.00	9.05	8.74	5.59	5.54	0.00
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.32	16.84	21.17	10.49	10.44	2.91	3.46	0.40	0.52	2.82	2.33	1.57	1.35	4.56	4.08	2.28	0.03	0.00	0.03	0.07	0.09
UO <sub>3</sub>	2.23	2.09	2.56	1.33	1.51	0.70	0.95	0.00	0.00	0.07	0.15	0.10	0.09	0.11	0.10	0.00	13.02	12.51	3.35	3.48	7.90
ThO <sub>2</sub>	0.48	0.55	1.04	6.55	7.74	6.90	5.45	0.00	0.00	0.30	0.10	0.02	0.04	0.12	0.04	0.05	0.06	0.00	0.05	0.00	0.03
CaO	3.37	3.77	3.30	2.51	2.45	4.24	5.91	0.14	0.10	1.85	16.72	17.05	17.01	14.48	15.13	16.72	11.95	15.23	20.57	20.12	19.89
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	1.54	0.00	0.84	0.95	0.89	0.83	0.02	0.00	0.32	0.03	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.09	0.00
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.12	3.15	0.11	7.68	7.85	7.40	7.15	0.11	0.03	1.21	0.05	0.12	0.03	0.24	0.13	0.16	0.04	0.17	0.08	0.00	0.14
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.49	0.00	2.51	2.69	2.33	2.11	0.00	0.00	0.17	0.00	0.07	0.11	0.12	0.00	0.00	0.00	0.02	0.09	0.00	0.00
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.24	1.01	0.21	9.09	9.15	8.43	7.46	0.00	0.00	0.81	0.18	0.12	0.15	0.33	0.17	0.11	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.22	0.10	3.13	3.30	3.87	2.45	0.00	0.00	0.41	0.13	0.01	0.05	0.21	0.10	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.07
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.14	0.22	2.41	2.44	2.30	1.56	0.00	0.00	0.31	0.18	0.17	0.03	0.02	0.02	0.15	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.55	2.53	3.39	2.06	1.87	0.78	0.85	0.30	0.19	0.66	0.39	0.19	0.21	0.68	0.69	0.56	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.69	1.18	1.31	0.32	0.32	0.00	0.00	0.12	0.10	0.13	0.09	0.12	0.10	0.33	0.33	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.30	0.76	1.06	0.22	0.14	0.00	0.00	0.05	4.02	3.84	0.09	0.11	0.06	0.35	0.18	2.17	0.00	0.00	0.02	0.00	6.30
Cl	0.08	0.10	0.09	0.42	0.49	0.13	0.07	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00	0.06	0.08	0.08	0.06	0.16
F	0.00	0.10	0.00	0.64	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.94	1.91	1.83	1.89
FeO	6.18	6.81	4.21	1.32	0.82	2.13	2.86	14.38	16.51	14.03	0.68	0.32	0.77	0.84	1.07	0.43	4.99	5.48	4.49	4.25	1.53
SiO <sub>2</sub>	0.30	0.02	0.00	0.51	0.18	0.00	0.03	0.11	0.21	4.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.17	0.00	0.07	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.04	2.79	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00
MnO	0.55	0.40	0.65	0.48	0.53	0.41	0.35	6.35	3.95	1.75	0.19	0.23	0.20	0.19	0.44	0.07	0.51	0.41	0.45	0.50	1.12
ZrO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01
HfO <sub>2</sub>	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	84.57	81.39	95.12	89.55	91.07	92.03	90.38	73.13	74.22	73.59	93.15	93.87	93.11	92.87	92.56	98.16	76.35	76.48	80.92	81.14	80.54



Näyte	JUL- L1227- NbY2	JUL-124- NbYFe1	JUL-182- Fe1	JUL-191- NbY2	JUL-191- NbYFe1	JUL-191- Zr2	JUL-207- NbY2	JUL-218- NbYCa3	JUL-218- NbYCaFe1	JUL-218- NbYCaFe2	JUL-218- NbYCaFeNbY1	JUL-29- NbY1	JUL-52- Fe1	JUL-52- Fe3	LER-Nb1	LER- Nb1Y1	LER- Nb1Y2	JUL- L114- NbCa1	JUL- L114- NbCa2	
oliveralli	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti	Samaraktiitti		
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	40.36	50.54	41.24	41.21	44.31	40.79	45.12	41.83	36.77	43.16	44.85	44.38	42.46	43.82	44.69	55.22	32.68	43.46	44.03	
TiO <sub>2</sub>	0.12	5.18	0.73	0.05	0.10	0.05	0.09	0.11	0.08	0.11	0.03	0.13	0.23	0.27	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.23	16.07	18.71	22.85	22.81	23.77	24.63	23.88	20.84	24.22	25.59	23.87	22.85	22.93	22.82	8.23	15.46	0.07	0.02	
UO <sub>2</sub>	3.77	0.62	1.35	1.51	4.27	0.99	2.04	2.22	1.99	2.51	1.44	3.44	2.30	2.25	2.13	0.23	1.91	8.35	7.68	
ThO <sub>2</sub>	0.26	0.49	3.99	1.04	0.13	1.02	0.61	1.50	1.42	1.10	0.34	1.16	2.73	2.49	2.21	0.62	1.77	0.01	0.02	
CaO	3.30	5.14	2.80	2.91	3.34	2.92	2.04	3.68	3.16	3.78	3.50	3.06	2.25	2.56	2.35	11.15	4.30	19.23	20.19	
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.12	0.00	0.05	0.06	0.00	0.27	0.05	0.00	0.08	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.03	0.00	
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.31	0.14	0.67	0.34	0.10	0.61	0.29	0.18	0.27	0.13	0.15	0.10	0.18	0.19	0.26	0.75	0.20	0.07	0.04	
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	0.12	0.33	0.00	0.00	0.15	0.00	0.12	0.06	0.00	0.00	0.09	0.00	0.01	0.00	0.10	0.10	0.00	0.01	
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11	0.18	3.20	0.37	0.13	0.41	0.25	0.43	0.56	0.42	0.32	0.18	0.52	0.49	0.79	0.98	0.56	0.00	0.00	
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09	0.34	3.04	0.34	0.03	0.50	0.32	0.51	0.57	0.45	0.19	0.28	0.52	0.55	1.22	0.86	1.09	0.00	0.04	
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.31	3.37	0.10	0.00	0.00	1.04	0.35	0.80	0.32	0.00	0.48	1.08	0.64	2.16	1.30	1.79	0.00	0.00	
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.86	2.48	3.39	3.52	3.06	3.76	4.16	3.48	3.19	3.49	3.59	4.47	4.39	4.20	4.19	1.70	3.09	0.03	0.08	
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.53	0.83	0.76	2.14	3.06	2.45	1.68	2.14	1.42	2.13	2.26	1.80	1.71	1.95	1.01	0.24	0.63	0.02	0.04	
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.66	0.61	0.63	2.47	3.03	2.76	1.75	2.36	1.62	2.44	2.31	0.11	1.54	1.79	0.17	9.80	18.96	6.27	6.01	
Cl	0.20	0.04	0.31	0.14	0.21	0.11	0.06	0.31	0.24	0.36	0.38	0.31	0.17	0.21	0.24	0.02	0.05	0.09	0.19	
F	0.19	0.00	0.57	0.28	0.58	0.40	0.53	0.59	0.07	0.45	0.81	0.37	0.75	0.71	0.13	0.00	0.00	1.36	1.12	
FeO	3.07	8.65	0.87	3.48	4.60	1.36	2.97	4.55	7.96	4.28	2.54	2.08	0.99	0.50	1.31	1.75	5.42	5.56	5.78	
SiO <sub>2</sub>	4.95	0.45	2.47	4.33	0.68	4.03	1.46	1.75	4.48	0.89	0.35	0.11	3.25	2.12	2.97	0.65	1.63	0.71	1.5	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.91	0.14	0.06	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.20	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	
MnO	0.20	0.41	0.60	0.22	0.22	0.28	0.22	0.15	0.17	0.26	0.35	0.45	0.78	0.96	0.82	0.44	0.64	0.63	0.56	
Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.14	0.00	0.08	0.00	0.00	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.13	0.03	0.09	0.14	0.12	0.03	0.13	0.02	0.11	0.03	0.05	1.56	0.06	0.00	0.85	0.17	0.47	0.00	0.00	
Total	78.80	83.04	84.27	78.91	84.37	80.45	84.05	82.80	72.83	84.30	84.58	83.54	82.76	84.13	84.05	91.32	82.53	77.53	78.18	